

Proyecto Fin de Carrera

Control vectorial en modo tensión de un motor asíncrono

Autor

Alberto Pueyo Gimeno

Director

Abelardo Martínez Iturbe

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013

Control vectorial en modo tensión de un motor asíncrono

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objeto el diseño, implementación y prueba de un control vectorial en modo tensión para un motor asíncrono.

El trabajo se ha llevado a cabo en diferentes fases.

- Modelado del sistema y cálculo de reguladores.
- Implementación y simulación del sistema completo.
- Construcción de la plataforma de control para el motor.
- Construcción de la interfaz gráfica y prueba física del control sobre el motor.

La simulación se ha llevado a cabo mediante el software Matlab Simulink, tanto en régimen continuo como en discreto. Se han analizado las diferentes respuestas de los reguladores, su dinámica, y el comportamiento general del sistema, entre otros parámetros.

Para realizar el control del motor en tiempo real, se ha utilizado la plataforma Dspace, que incluye la tarjeta DS1103 y el software de control ControlDesk. A partir de este software se ha creado una interfaz para el usuario, con varios paneles virtuales que permiten tanto el control como la observación de los parámetros del sistema.

Por otra parte, se ha construido una plataforma de control para el motor sobre un armario móvil, que se compone de varios elementos: inversor trifásico, sensores de corriente y tensión, resistencias de frenado, medidas de seguridad, etc

Esta plataforma, aparte de ser usada en este proyecto, quedará disponible para su utilización en posteriores pruebas o prácticas con el motor asíncrono, con otros tipos de control.

Finalmente, se ha probado físicamente el control vectorial sobre el motor asíncrono, en tiempo real, controlando diferentes parámetros, observando diferencias con la simulación, y analizando el comportamiento del motor.

ÍNDICE

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL AUTOR.....	3
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	3
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.4 ALCANCE.....	5
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FÍSICO. CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE CONTROL PARA EL MOTOR ASÍNCRONO.....	6
2.1 VISIÓN GLOBAL DEL SISTEMA FÍSICO	6
2.2 ESPECIFICACIONES DE LAS PARTES QUE COMPONEN LA PLATAFORMA.....	7
2.2.1 Motor asíncrono.....	7
2.2.2 Rectificador-inversor del motor asíncrono	8
2.2.3 Motor síncrono	9
2.2.4 DC- Inversor del motor Síncrono	10
2.2.5 Rectificador del motor síncrono	11
2.2.6 Tarjeta DS1103.....	11
CAPÍTULO 3. EL CONTROL VECTORIAL EN MODO TENSIÓN.....	13
3.1 EL CONTROL VECTORIAL EN LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN	13
3.2 REFERENCIAS DEL CONTROL VECTORIAL	13
3.3 VARIABLES Y EXPRESIONES	14
3.4 ESTRATEGIA DE CONTROL.....	17
CAPÍTULO 4. ALGORITMOS DE CONTROL.....	19
4.1 MODELADO DEL MOTOR Y CARGA RESISTIVA	19
4.2 ALGORITMOS DE CONTROL PARA PAR Y CAMPO MAGNÉTICO.....	20
4.3 RESULTADOS.....	21
CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PLANTA Y LOS CONTROLADORES.....	22
5.1 INTRODUCCIÓN.....	22
5.2 RESULTADOS	25
CAPÍTULO 6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN DSPACE.....	31
6.1 INTRODUCCIÓN	31
6.2 INTERFAZ GRÁFICA Y OPERACIÓN EN CONTROLDESK	31
6.3 RESULTADOS	35

CONCLUSIONES.....	40
LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS	41
REFERENCIAS	42

ANEXOS

ANEXO I	HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LA PLATAFORMA PARA EL CONTROL DEL MOTOR ASÍNCRONO.	2
ANEXO II	CONFIGURACIÓN Y CONEXIONADO DE LOS COMPONENTES DE LA PLATAFORMA.....	12
ANEXO III	DESARROLLO DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL. CÓDIGO MATHCAD	25
ANEXO IV	DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA	34
ANEXO V	JUSTIFICACIÓN ALGORITMO SVPWM	44
ANEXO VI	PROTOCOLO DE PUESTA EN MARCHA DE LA PLATAFORMA Y DEL CONTROL.	47
LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS DE LOS ANEXOS.....		50

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL AUTOR.

Este proyecto supone la oportunidad de poner en práctica muchos de los conocimientos adquiridos durante la carrera, tanto de Ingeniería Técnica Electrónica como del segundo ciclo de Ingeniería Industrial. Y es que en el desarrollo del mismo intervienen aspectos de diferentes materias: regulación automática o de sistemas, sensores e instrumentación, electrotecnia, o instalaciones eléctricas.

Además, me ofrece la oportunidad de adquirir experiencia y conocimientos con la plataforma Dspace, con la que se desarrollará el control a través de su tarjeta DS1103 PPC, y de su software de control ControlDesk. Una experiencia que, en mi opinión, puede serme útil de cara al futuro laboral.

Por todo esto, la realización práctica de este proyecto, “Control vectorial en modo tensión de un motor asíncrono” se muestra de una manera muy atractiva y positiva.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto consiste en realizar un control vectorial en modo tensión sobre un motor asíncrono, utilizando el hardware y software que constituye la aplicación Dspace.

El proyecto en global se enfoca de forma didáctica para que, una vez terminado, pueda ser utilizado en posteriores proyectos, trabajos, prácticas de laboratorio, etc. El trabajo se ha desarrollado en el laboratorio BSH, en la cuarta planta del edificio Ada Byron.

Como resultado del proyecto se tiene una plataforma que incluye el inversor de alimentación del motor, el propio motor asíncrono, un motor síncrono con par programable que actúa como carga para el motor, la tarjeta de generación de señales de control y tratamiento de las señales de realimentación, sensores de corriente y tensión, y por último un PC que sirve de interfaz máquina usuario para realizar un control en tiempo real. La descripción en detalle de cada elemento de la plataforma se desarrolla en capítulos posteriores.

El desarrollo del proyecto se ha dividido en varias fases.

La primera parte, comienza por modelar el sistema y generar los esquemas de control, adaptados al control vectorial, así como diseñar y calcular los reguladores necesarios. Para ello se hará uso de los programas Matlab Simulink [9] y Mathcad [8].

Una vez completado el diseño teórico, se realizan las simulaciones del sistema mediante Mathlab Simulink [9]. Se analizan diferentes parámetros, formas de onda, respuestas de control, todo en dos situaciones, régimen de tiempo continuo y discreto.

Después de obtener una simulación coherente y conforme, se construye la plataforma de control sobre un armario móvil disponible en el laboratorio. Sobre este armario se colocan el inversor y las resistencias de frenado, y acoplados en carril DIN, la tarjeta de señales de control, sensores de corriente y tensión, dos fuentes de alimentación y un contactor de seguridad. Todo con su correspondiente cableado y conectado adecuadamente.

La implantación del control en la tarjeta DS1103 se realiza compilando los bloques del programa de control creado en Matlab Simulink con la herramienta Real Time Workshop de Matlab.

Con el sistema preparado y conectado, se realizan las pruebas del control sobre el motor. Primero, sin conectar el motor se procede a calibrar los sensores y ajustarlos, para obtener unas medidas lo más precisas posibles. Además se comprueba y verifica que la parte de seguridad, fundamental en estos casos, funciona bien, tanto en software como en hardware. Finalmente, se conecta el sistema con el motor y se realiza el control. El software ControlDesk [5] permite construir una interfaz entre el usuario y el sistema a través de paneles con instrumentos. Estos paneles son completamente configurables, permitiendo al usuario interactuar en tiempo real con los parámetros característicos del control: referencias, constantes, seguridad, etc además de poder visualizar los resultados en tiempo real.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es realizar un control de un motor asíncrono a través de la técnica de control vectorial en modo tensión.

Como objetivo secundario, se realiza la construcción de la plataforma física de control sobre un armario móvil, con la intención de que permanezca fija para posteriores usos en prácticas, proyectos, trabajos, etc.

1.4 ALCANCE

El resultado principal del proyecto es una plataforma de control para el motor asíncrono basada en el control vectorial por tensión.

El trabajo no se ha realizado a partir de unos objetivos prefijados en cuanto a tiempos de respuesta, sobreoscilaciones, etc. Se ha querido hacer un control funcional, sin atenerse a unas dinámicas o respuestas concretas. No obstante, se han elegido unos parámetros de control que proporcionan unas dinámicas aceptables y coherentes con el sistema, siempre desde mi propio criterio y el de mi tutor.

Con la plataforma se incluye un programa de control de ControlDesk, que consta de 2 paneles, cuyas características son:

- Máxima frecuencia de muestreo que permite la tarjeta con el programa generado, 10 KHz.
- Bloque global de seguridad y protección, con indicación de tipo de fallo, enable manual, reset del fallo, etc.
- Bloque de generación del tipo de carga resistente para el motor.
- Seguimiento de los principales parámetros de control y seguridad: corrientes de par y campo, deslizamiento, par motor, velocidad, referencias, tensión de bus, etc.
- Generación de consignas constantes o cuadradas para los diferentes lazos de regulación.
- Actuación en tiempo real sobre las constantes de los reguladores de los lazos de corriente de par, corriente de campo, par motor y velocidad.

Además del programa de control, se obtienen también las simulaciones de Matlab Simulink, con el modelado del sistema completo, y el análisis y diseño de los algoritmos de control.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FÍSICO. CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE CONTROL PARA EL MOTOR ASÍNCRONO.

En este capítulo se describe la plataforma de control para el motor asíncrono. Se describe el funcionamiento y se exponen las características generales de los principales elementos que componen la plataforma, sin entrar en detalles de funcionamiento ni del interconexionado.

Los detalles de las características de los principales componentes se muestran en el Anexo I y los detalles de configuración y conexionado de los componentes de la plataforma se muestran en el Anexo II.

2.1 VISIÓN GLOBAL DEL SISTEMA FÍSICO

La plataforma de control para el motor asíncrono consiste en un sistema controlado por la tarjeta DS1103 PPC de Dspace (basada en un procesador PPC y un DSP esclavo). La tarjeta DS1103 es capaz de desarrollar el control sobre el motor asíncrono sometido a cualquier carga mecánica. Dicha carga mecánica es dada por un motor síncrono cuyo eje está acoplado solidariamente con el del motor asíncrono.

La tarjeta comanda sobre dos inversores. El primero, el inversor del motor asíncrono, es controlado totalmente por la tarjeta, y el inversor del motor síncrono tiene un control propio, el cual está configurado para recibir la señal de par que debe desarrollar el motor síncrono. El inversor del motor asíncrono incluye el rectificador necesario para disponer del bus de continua, del cual se alimenta el inversor. Sin embargo, el inversor del motor síncrono no incluye rectificador, por eso se necesita uno independiente para generar dicho bus.

El sistema físico se compone de seis elementos principales. En la figura 2.1 se observa un esquema simplificado de interconexión entre los componentes del sistema físico y su interacción entre ellos.

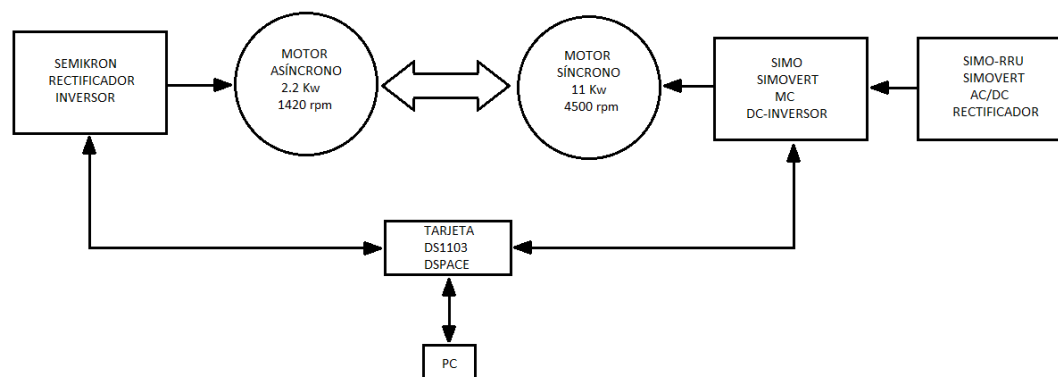


Fig. 2.1 Esquema simplificado de interacción entre los principales componentes.

2.2 ESPECIFICACIONES DE LAS PARTES QUE COMPONEN LA PLATAFORMA

En este apartado se muestran los seis principales componentes de la plataforma de control, los cuales son el inversor de alimentación del motor asíncrono, el propio motor, un motor síncrono que actúa como carga, el DC-inversor del motor síncrono, el rectificador regenerativo que alimenta dicho inversor y por último la tarjeta de generación de señales de control y tratamiento de las señales de realimentación DS1103.

En el Anexo II se describe en detalle el inter conexionado de todos componentes, tanto principales como secundarios, de la plataforma con todas las señales de entrada y salida pertenecientes a cada uno de ellos.

A continuación se muestran las especificaciones generales de estos seis componentes.

2.2.1 Motor asíncrono.

El motor de inducción Siemens modelo 1LA7 106-4AA10 es un motor asíncrono trifásico. Su devanado se alimenta directamente a través del rectificador-inversor de la marca Semikron. Su eje está acoplado solidariamente con el eje del motor síncrono. En la figura 2.2 se observa una imagen del motor.



Fig. 2.2 Imagen del motor de inducción asíncrono

En la tabla I se pueden ver las principales características del motor asíncrono. Además, se pueden consultar en detalle en el catálogo M 11 2000 de Siemens 'Squirrel Cage Motors. Low-Voltage Motors' página 3/2.

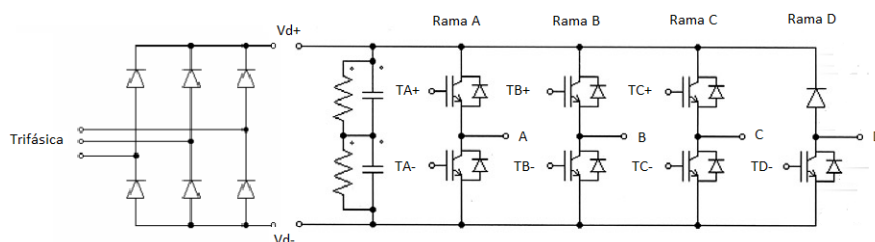
Tabla I Características generales del motor asíncrono

<i>Características generales</i>	<i>Motor asíncrono Siemens</i>
Modelo	1LA7 106-4AA10
Potencia	2.2 kW
Frecuencia nominal	50Hz/60Hz(Se trabajará a 50Hz)
Tensión nominal	400VrmsY
Corriente nominal a 400VrmsY	4.7 Arms (6.64 A máximo)
Corriente magnetizante	2.4 Arms (3.39 A máximo)
Factor de potencia	0,82
Velocidad nominal	1420 rpm
Velocidad de sincronismo	1500 rpm
Número de pares de polos	2
Par nominal	15 Nm
Peso	22 Kg
Grado de protección	IP55
Tipo de construcción	IM B3
Resistencia estator	3,8 Ω
Inductancia estator	0,28 H
Resistencia rotor	2,6 Ω
Inductancia rotor	0,28 H

2.2.2 Rectificador-inversor del motor asíncrono

El rectificador-inversor, modelo Semiteach IGBT SKM 50 GB SKD 51 de la marca Semikron, contiene un rectificador que se alimenta desde un autotransformador y un inversor que proporciona tensión al motor asíncrono. El rectificador proporciona un bus de continua al inversor, el cual consta de tres ramas de conmutación (rama A, rama B y rama C). Cada rama contiene dos IGBTs (IGBT+ e IGBT-) y además contiene una rama de seguridad para conectar las resistencias de frenado. Esta última rama (rama D) conmuta el bus de continua con un solo IGBT.

Las señales de control de los IGBTs son de lógica positiva (se cierran con un nivel positivo de tensión). Cada rama posee una señal de alarma que se dispara cuando ocurre un fallo. La parte de control de IGBTs necesita una alimentación de +15VDC. En la figura 2.3 se observa un esquema del rectificador-inversor.

**Fig. 2.3** Esquema del rectificador-inversor del motor asíncrono

El control, que se alimenta con una tensión de 15V, cuenta con un sistema de seguridad que interrumpe dicha alimentación cuando la temperatura sobrepasa los límites de seguridad. La ventilación es forzada mediante ventilador, que se alimenta directamente de la red bifásica.

En la tabla II se muestran las principales características del rectificador-inversor, y en la figura 2.4 se puede ver una imagen ilustrativa de él.

Tabla II Características generales del inversor del motor asíncrono

<i>Características generales</i>	<i>Rectificador-Inversor del motor asíncrono</i>
Modelo	Semiteach SKM 50 GB SKD 51
Alimentación control	15V
Tensión nominal	440V AC ó 750V DC
Corriente máxima salida	30 A rms
Frecuencia máxima de conmutación	20 kHz
Señal de disparo IGBTs	15 V lógica positiva
Señal de alarma por rama	15 V lógica positiva
Ventilación	Forzada independiente. 220 V AC

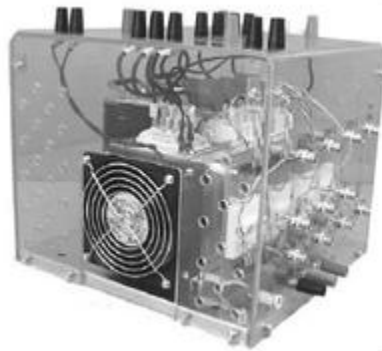


Fig. 2.4 Imagen ilustrativa del rectificador-inversor

2.2.3 Motor síncrono

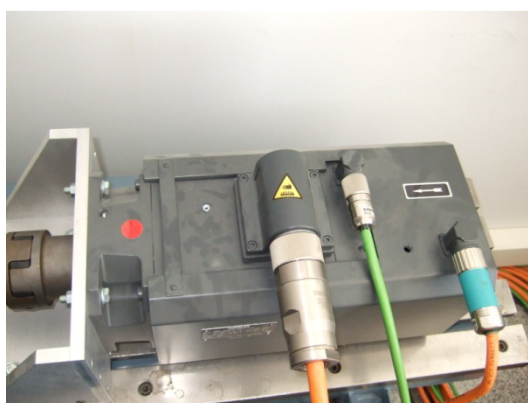
El motor síncrono de imanes permanentes (“permanent magnet synchronous machine”, PMSM) es alimentado por un DC-Inversor (parte de un bus de continua) de control de par de la marca Siemens, “Simovet Masterdrivers Motion Control ” (MC). El mismo motor síncrono posee un encoder óptico de medida de la velocidad y cuenta con ventilación forzada independiente que se alimenta directamente a partir de la red bifásica.

En la tabla III se muestran las principales características del motor síncrono, y en la figura 2.5 se puede ver una imagen de él.

Tabla III Características generales del motor síncrono

<i>Características generales</i>	<i>Motor síncrono de Siemens</i>
Modelo	1FT6084-8SH71 1AA0
Peso	25 Kg
Potencia nominal	9.4 Kw
Par nominal	20 Nm
Corriente nominal	24.5 Arms
Velocidad nominal	4500 rpm
Frecuencia nominal	300 Hz
Constante de par	0.82 Nm/A
Momento de inercia	0.0048 Kg*m ²
Medida de velocidad	Encoder óptico de 2048 pulsos por rev (B01 2048 S/R)
Ventilación	Forzada independiente. 220 V AC

Estas características pueden observarse en el catálogo [10] página 4/5 o 4/11

**Fig. 2.5** Imagen del motor síncrono

2.2.4 DC- Inversor del motor Síncrono

El DC-inversor del motor síncrono, marca Siemens serie Simovert Masterdrivers Motion Control, se alimenta del bus de continua proporcionado por el rectificador (AC/DC) también de la marca Simovert Masterdrivers. En la tabla IV se muestran las características principales del inversor.

Tabla IV Características generales del inversor del motor síncrono

<i>Características generales</i>	<i>DC-Inversor de Siemens</i>
Modelo	6SE7022-6TC51-Z, equipo compacto
Peso	21 Kg
Potencia salida	16.8...20.3 kVA
Tensión nominal bus de continua de entrada	510..650 V DC (10-15%)
Tensión nominal de salida	3 fases AC x (0..tensión nominal entradas x 0.64)
Corriente nominal de entrada	30.4 A DC
Corriente nominal de salida	25.5 Arms
Frecuencia nominal de salida	0..400 Hz
Frecuencia de conmutación	5...10 kHz
Grado de protección	IP20

Estás características pueden observarse entre el catálogo [10] página 3/3 y el catálogo [11] páginas 11-1 y 11-2.

2.2.5 Rectificador del motor síncrono

El rectificador del motor síncrono, marca Siemens Simovert Masterdrivers Motion Control, se trata de una unidad de alimentación/devolución (regenerativa) en cuanto a que es capaz de devolver energía a la red eléctrica cuando el motor síncrono es arrastrado como generador. Para poder adaptar esta unidad regenerativa a la red se utiliza un autotransformador.

En la tabla V se muestran las principales características del rectificador

Tabla V Características generales del rectificador del motor síncrono

<i>Características generales</i>	<i>Rectificador Siemens</i>
Modelo	6SE7028-6EC85-1AA0, equipo compacto
Peso	23 Kg
Potencia salida	Correspondiente al motor que alimenta
Tensión nominal bus de continua de entrada	510..650 V DC (10-15%)
Tensión nominal de salida	3 fases AC 380(-15%)...480(+10%)Vrms AC
Corriente nominal regeneración con autotransformador en la línea de rectificador	68 Arms AC
Corriente nominal regeneración con autotransformador en la línea de red	25.5 Arms
Frecuencia nominal de salida	82 Arms AC
Grado de protección	IP20

Estas características pueden observarse entre el catálogo [10] página 3/15 y el catálogo [11] página 3-5, 14-1 y 14-2.

2.2.6 Tarjeta DS1103.

La tarjeta DS1103, de la marca Dspace, se trata de un controlador digital capaz de proporcionar tanto una gran potencia de cálculo como un amplio número de señales entrada/salida. El procesador principal es un "PowerPC 604" a 33 MHz, y tiene un subsistema esclavo basado en un DSP de "Texas Instruments", en concreto el modelo TMS320F240. Dicho modelo se caracteriza por su excelente predisposición al desarrollo de todo tipo de controles electrónicos. Las conexiones que ofrece la tarjeta son:

- 16 canales (multiplexados cada 4) analógicos-digitales ADC, 16 bits, 4us, +-10V.
- 4 canales analógicos-digitales ADC independientes, 12 bits, 8000ns, +-10V.
- 8 canales (multiplexados cada 4) digitales-analógicos DAC, 14 bits, 6us, +-10V.
- 7 canales de tratamiento de velocidades angulares de encoders incrementales.
- 32 líneas digitales de entrada-salida I/O programables en grupos de 8 bits.

El paquete de software, que proporciona Dspace con la misma tarjeta, está compuesto por el programa "ControlDesk", con el cual se pueden generar paneles virtuales de control en el PC y por el compilador "Real Time Work Shop" (RTL, RTW, TDE) para generar código C a partir de archivos de Matlab/Simulink.

La tarjeta DS1103 está insertada en una caja de extensión que posee una fuente de alimentación independiente. La tarjeta se comunica con el PC a través de fibra óptica. Además se conecta a través de seis buses con una caja de multiconexión (CP1103) que permite acceder fácilmente a todas las señales, analógicas y digitales, que ofrece la misma tarjeta. En las figuras 2.6 y 2.7 se pueden ver la caja de multiconexión y el esquema de los conectores de la caja CP1103. El datasheet de la tarjeta DS1103 se encuentra en el anexo I.



Fig. 2.6 Caja de multiconexión CP1103

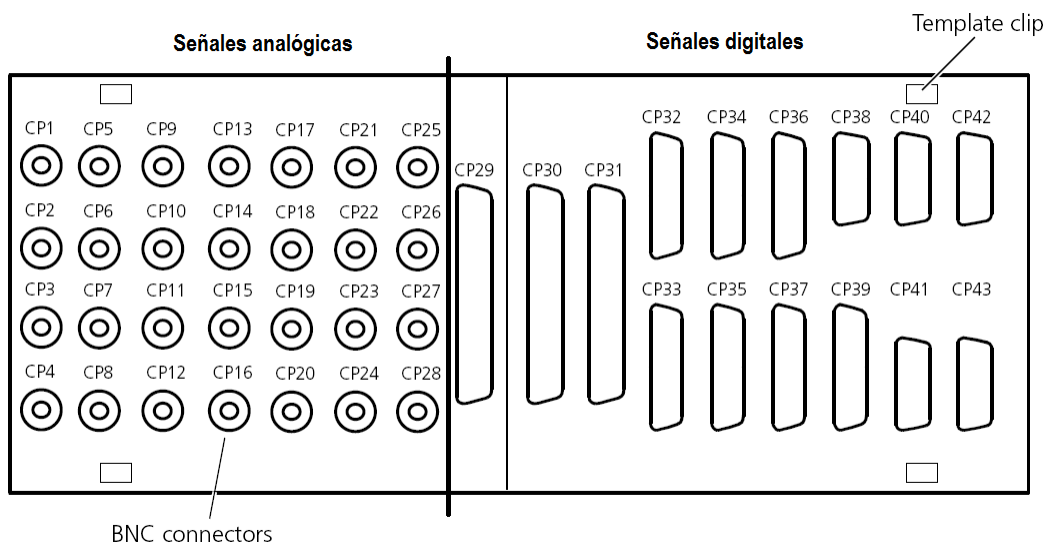


Fig. 2.7 Esquema de conectores de la caja CP1103

CAPÍTULO 3. EL CONTROL VECTORIAL EN MODO TENSIÓN

En este capítulo se describe de forma resumida y clara en qué consiste el control vectorial en modo tensión y como se aplica a las máquinas de inducción a través de sus ecuaciones y parámetros. Detrás del control vectorial hay una extensa base teórica con demostraciones que no aparecen aquí, no obstante se puede consultar esta información en el libro [1] a partir de la página 122 o, de forma más práctica en el PFC [6], a partir de la página 111.

3.1 EL CONTROL VECTORIAL EN LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

El control vectorial, como su propio nombre indica, opera con los vectores de las magnitudes físicas. Para ello se aplican unos cambios de referencia a estas magnitudes, que veremos más adelante. El objetivo del control vectorial en las máquinas de inducción es conseguir un desacople entre el flujo magnético y el par electromagnético, para así lograr un control óptimo de este último. Para ello, se aplica la teoría de vectores espaciales en referencias concretas en las que, mediante dos componentes de corriente ortogonales, se controla independientemente el flujo y el par de la máquina. Este control se asemejaría al que se utiliza en la máquina de continua con excitación independiente.

El control vectorial puede estar orientado a tres sistemas de referencia: flujo del estator, flujo del rotor y flujo magnetizante. En este trabajo se va a utilizar el sistema orientado al flujo del rotor, por ser el más utilizado. Tiene dos implementaciones, método directo y método indirecto. En el método directo, que es el que se desarrollará en el proyecto, las magnitudes de flujo necesarias para el control se calculan por medio de un modelo de flujo a partir de la velocidad y de las corrientes medidas del estator. En el método indirecto, basado en la prealimentación, las magnitudes se obtienen a partir de las corrientes de referencia calculadas para dar el par o velocidad deseados.

3.2 REFERENCIAS DEL CONTROL VECTORIAL

Se aplican dos cambios de referencia o transformaciones a las magnitudes físicas con las que queremos trabajar en forma de vectores. En la primera, se pasa de las tres componentes del sistema trifásico temporal de una variable, a las dos componentes del vector que representa a dicha variable (transformación de Clark). Por ejemplo, para el vector de corriente de estator \vec{i}_s se tiene:

$$i_{sD} = \text{Re}[\vec{i}_s] = \frac{2}{3} \cdot (i_{sA} - \frac{1}{2} \cdot i_{sB} - \frac{1}{2} \cdot i_{sC})$$

$$i_{sQ} = \text{Im}[\vec{i}_s] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_{sB} - i_{sC})$$

Por tanto, matricialmente queda:

$$\begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix}$$

El resultado son las dos componentes del vector de corriente del estator. Como se ha comentado antes, se va a trabajar en el sistema de referencia orientado al flujo del rotor, luego hay que pasar de la referencia estacionaria fija del estator a la referencia móvil fija del flujo del rotor (transformación de Park). Matricialmente resulta:

$$\begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho_r & \sin \rho_r \\ -\sin \rho_r & \cos \rho_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \end{bmatrix}$$

Donde ρ_r representa el ángulo entre el eje estacionario sD, y la nueva referencia, que coincide con el vector de flujo del rotor, y cuya variación en el tiempo dará la velocidad angular del flujo del rotor: $\omega_{mr} = d\rho_r/dt$. En la figura 3.1 se pueden ver las dos transformaciones.

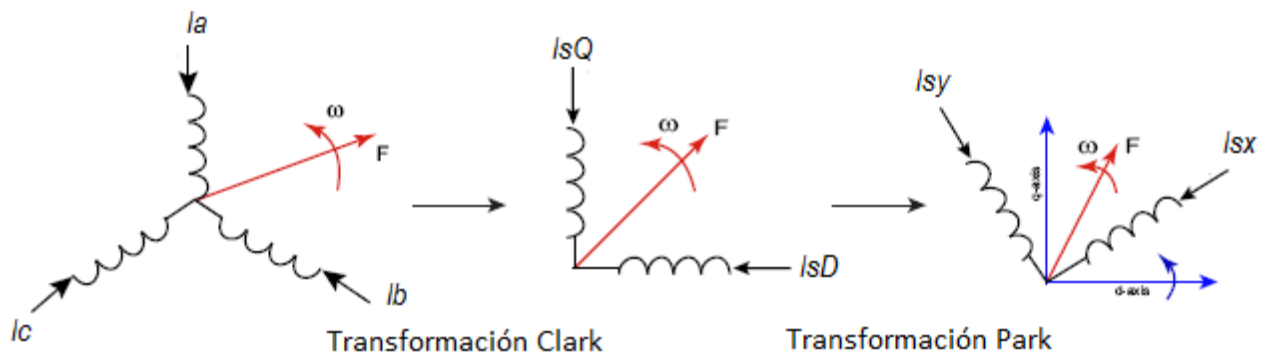


Fig. 3.1 Transformaciones de referencia.

3.3 VARIABLES Y EXPRESIONES

A continuación se muestran las expresiones que construyen el control vectorial por tensión en las máquinas de inducción, orientado en la referencia del flujo del rotor. Estas expresiones son las que luego se implementarán en forma de bloques en Matlab/Simulink, en el Anexo II se puede ver su descripción en detalle. En la tabla VI se pueden ver los parámetros que intervienen y su significado.

Tabla VI Parámetros básicos del control vectorial por tensión

Parámetro	Significado
t_e	Par electromagnético
p	Número de polos del motor
L_m	Inductancia magnetizante
L_r	Inductancia del rotor
\vec{i}_{mr}	Vector de corriente de magnetización del rotor
i_{sx}	Componente real del vector de corriente del estator
i_{sy}	Componente imaginaria del vector de corriente del estator
L_s	Inductancia del estator
L'_s	Inductancia transitoria del estator
R_s	Resistencia del estator
u_{sx}	Componente real de tensión total
u_{sy}	Componente imaginaria de tensión total
u_{dx}	Componente real de tensión de desacoplo rotacional
u_{dy}	Componente imaginaria de tensión de desacoplo rotacional
\hat{u}_{sx}	Componente real de tensión del controlador
\hat{u}_{sy}	Componente imaginaria de tensión del controlador
ω_{mr}	Velocidad del campo magnético giratorio
ψ_r	Flujo del rotor
T_r	Constante de tiempo del rotor
ρ_r	Ángulo del vector de flujo del rotor

Expresión del flujo del rotor:

$$\vec{\psi}_r = L_m \cdot \vec{i}_{mr}$$

Expresión del par electromagnético:

$$t_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m^2}{L_r} \cdot |\vec{i}_{mr}| \cdot i_{sy}$$

Podemos ver que el par que genera la máquina tiene una componente productora de flujo, $|\vec{i}_{mr}|$, y otra componente de intensidad productora de par, i_{sy} . En un motor de inducción con rotor en cortocircuito, como es el caso, se cumple que si $|\vec{i}_{mr}|$ se mantiene constante, $|\vec{i}_{mr}| = i_{sx}$, de este modo, mediante la componente real del vector de corriente del estator, i_{sx} , se fija un flujo constante, mientras que con la componente imaginaria i_{sy} se controla el par. Éste es el desacoplo antes mencionado, que nos permite controlar el motor de inducción como si de una máquina de continua se tratase.

Expresiones del desacoplo:

$$\hat{u}_{sx} = L'_s \cdot \frac{di_{sx}}{dt} + R_s \cdot i_{sx}$$

$$\hat{u}_{sy} = L'_s \cdot \frac{di_{sy}}{dt} + R_s \cdot i_{sy}$$

Estas componentes de tensión son generadas por los controladores de corriente, siguiendo un primer orden. Por otra parte, las componentes de desacoplo rotacional son:

$$u_{dx} = -\omega_{mr} \cdot L'_s \cdot i_{sy}$$

$$u_{dy} = \omega_{mr} \cdot L'_s \cdot i_{sx} + (L_s - L'_s) \cdot \omega_{mr} \cdot |\vec{i}_{mr}|$$

Las componentes totales del vector de tensión del estator que queremos introducir en el motor serán las sumas de las expresiones anteriores:

$$u_{sx} = \hat{u}_{sx} + u_{dx}$$

$$u_{sy} = \hat{u}_{sy} + u_{dy}$$

Una vez obtenidas estas componentes totales, lo único que resta es pasar del sistema de referencia espacial del flujo del rotor al sistema temporal trifásico, aplicando las matrices inversas de cambio de referencia que hemos visto en el apartado anterior.

Como se acaba de ver, para el desacoplo de circuitos tratado se necesita conocer los valores de $|\vec{i}_{mr}|$ y ω_{mr} . Además, también es necesario conocer el ángulo ρ_r , para realizar el paso de las variables necesarias de tres fases a dos. Los modelos de flujo son los encargados de calcular el módulo y argumento de los vectores de flujo y se basan en la ecuación de tensión del rotor.

En el caso del control orientado al flujo del rotor, las expresiones del modelo de flujo son:

$$T_r \cdot \frac{d|\vec{i}_{mr}|}{dt} + |\vec{i}_{mr}| = i_{sx}$$

$$\omega_{mr} = \omega_r + \frac{i_{sy}}{T_r \cdot |\vec{i}_{mr}|}$$

Con estas dos ecuaciones se comprueba que conociendo i_{sx} e i_{sy} se pueden calcular $|\vec{i}_{mr}|$ y ω_{mr} . De estos valores se obtienen respectivamente el módulo y el argumento del flujo del rotor, es decir, el vector espacial del flujo del rotor. Los valores de las componentes i_{sx} e i_{sy} se obtendrán de la medida de la velocidad del rotor ω_r y de la medida de las corrientes actuales del estator i_{sA} , i_{sB} e i_{sC} . Partiendo de estos tres valores se pasa a dos fases calculando las componentes i_{sD} e i_{sQ} del vector espacial de la corriente del estator en la referencia estacionaria fija al estator, y con el ángulo realimentado ρ_r se obtienen las componentes de dicho vector espacial en la referencia orientada al flujo del rotor. En la figura 3.2 se puede ver un diagrama de bloques del cálculo del modelo de flujo.

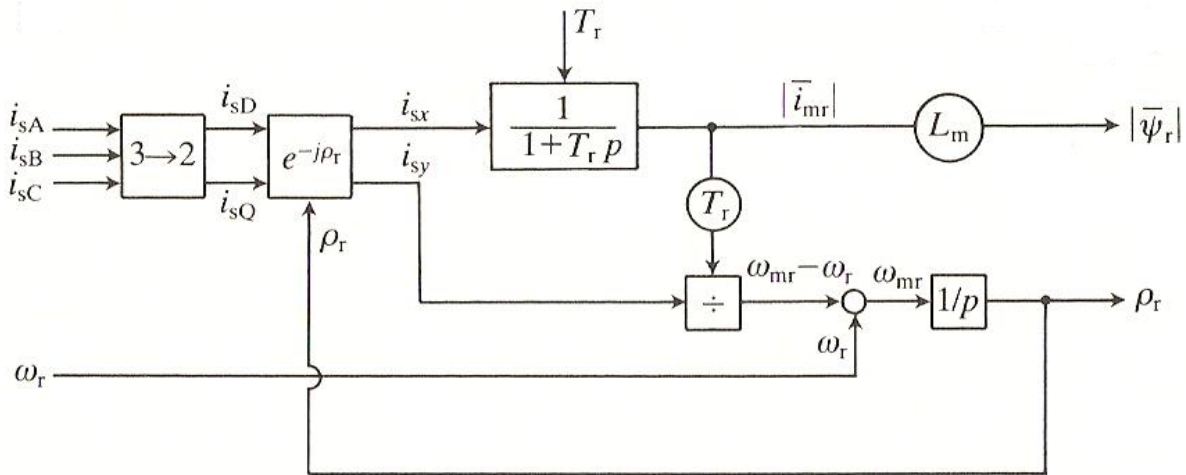


Fig. 3.2 Modelo de flujo en la referencia orientada al flujo del rotor. Entradas i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} y ω_r .

3.4 ESTRATEGIA DE CONTROL

En este apartado se describe el tipo de control que se va a aplicar sobre el inversor trifásico. Como se ha visto, el resultado de los cálculos del control vectorial es un sistema de tres tensiones de referencia temporales, con las cuales queremos alimentar el motor a través del inversor.

La estrategia de control utilizada con el inversor es el SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Esta técnica consiste en aplicar al inversor diferentes vectores espaciales durante unos tiempos determinados y en un orden determinado, según un vector de referencia que queramos obtener.

Hay varias formas de implementar el SVPWM, aquí se va a utilizar la forma basada en portadora, (ver referencia [13]) sin determinación de sector, que nos permite un cálculo rápido y eficiente, lo cual también es importante de cara a la frecuencia máxima de trabajo de la tarjeta DS1103.

Las expresiones del control son las siguientes:

$$\frac{v_{control,a}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{v_a - v_k}{V_d/2}$$

$$\frac{v_{control,b}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{v_b - v_k}{V_d/2}$$

$$\frac{v_{control,c}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{v_c - v_k}{V_d/2}$$

donde:

- v_a, v_b, v_c son las tensiones de referencia, resultados del cálculo del control vectorial.
- $v_{control,a}, v_{control,b}, v_{control,c}$ son las tensiones de control que queremos obtener, es decir, los ciclos de trabajo con los que vamos a controlar cada rama del inversor.
- V_d es la tensión del bus de continua que alimenta al inversor.
- \hat{V}_{tri} es la amplitud de la onda triangular (portadora).

- v_k es el offset de tensión, que se calcula de la siguiente forma:

$$v_k = \frac{\text{Max}(v_a, v_b, v_c) + \text{Min}(v_a, v_b, v_c)}{2}$$

En cuanto a aprovechamiento del bus de continua, aplicando la técnica SVPWM, el valor eficaz máximo de tensión de línea que se puede obtener a la salida del inversor es el valor eficaz de tensión de línea de la red (suponiendo en el rectificador que el bus de continua es: $V_d = \sqrt{2} \cdot V_{ll}$, donde V_{ll} es la tensión de línea eficaz de red. De este modo la relación de tensión entrada/salida es 1:1. En este aspecto, este tipo de control es equivalente al PWM (Pulse Width Modulation) con inyección del tercer armónico. La demostración de esta equivalencia se puede ver en el ANEXO V. En la figura 3.3 se puede ver una imagen ilustrativa de las formas de onda resultantes.

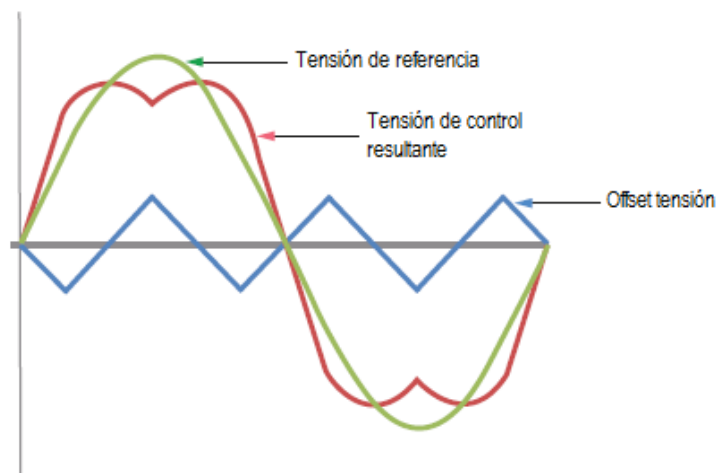


Fig. 3.3 Formas de onda SVPWM (carrier based)

Como se ha comentado antes, estas expresiones están implementadas en forma de bloques en Matlab/Simulink, en el Anexo IV se pueden ver en detalle.

CAPÍTULO 4. ALGORITMOS DE CONTROL.

En el diseño de los algoritmos de control y cálculo de sus parámetros se utiliza el software de Mathcad. Éste es un programa con gran potencia de cálculo y tiene un fácil manejo a la hora de introducir las ecuaciones. El listado de ecuaciones va en orden consecutivo como corresponde al diseño del controlador. En el Anexo III se muestra el desarrollo del diseño de los algoritmos de control en código de Mathcad.

4.1 MODELADO DEL MOTOR Y DE LA CARGA

Para modelar el comportamiento del motor asíncrono en Matlab/Simulink se utiliza un bloque S-Function, disponible de trabajos anteriores. Este bloque contiene código C en el que están escritas las ecuaciones que describen la dinámica y el comportamiento del motor. El bloque tiene como entradas las tres tensiones de fase y el par resistente que va a enfrentar el motor, y se obtienen como salidas las tres corrientes de fase, la velocidad y el par generado.

En la Fig.4.1 se pueden ver los parámetros que hay que introducir para configurar el bloque.

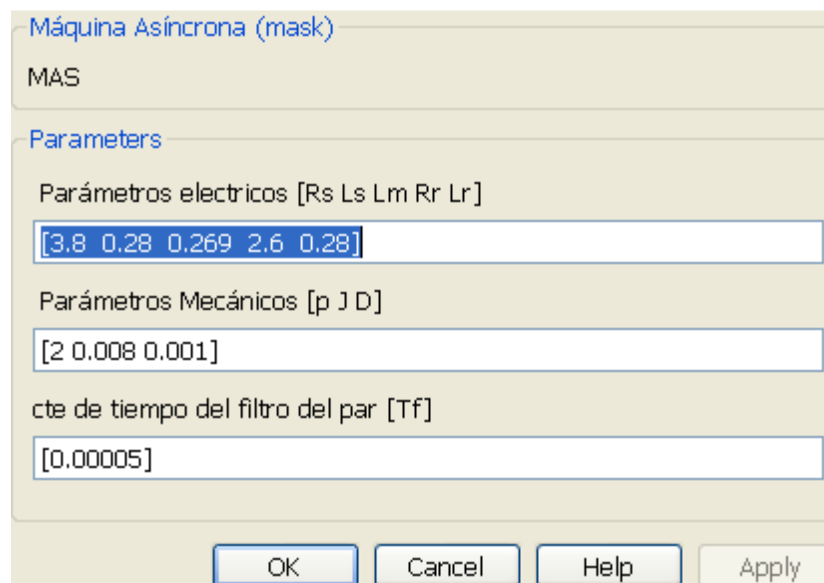


Fig. 4.1 Parámetros de configuración del modelo de máquina asíncrona

Estos parámetros son: Resistencias de estator y rotor, inductancias de estator y rotor, inductancia magnetizante, número de polos, coeficiente de inercia (J), coeficiente de rozamiento viscoso (D), y constante de tiempo del filtro de par.

En cuanto a la carga que enfrenta el motor, se define a través de un bloque que contiene una ecuación cuadrática. Necesita como parámetro un punto de la curva par-velocidad, que en este caso es el nominal (14.7 Nm y 1420 rpm).

4.2 ALGORITMOS DE CONTROL PARA PAR Y CAMPO MAGNÉTICO

Los algoritmos de control del sistema se dividen en dos partes diferenciadas, de acuerdo con las ecuaciones vistas en teoría y el desacoplo mencionado. Por un lado está la rama de corriente de campo, i_{sx} , y por otro la rama de corriente de par i_{sy} .

Para la rama de corriente de par, se propone implementar una estrategia de control en cascada para tres señales realimentadas, señal de corriente de par, señal de par y señal de velocidad, correspondientes al lazo de corriente de par, lazo de par y lazo de velocidad. La salida del lazo de corriente de par es la componente de tensión \hat{u}_{sy} , necesaria para el control vectorial.

Por otro lado, para la rama de corriente de campo se propone la misma estrategia de control, pero con dos lazos, lazo de corriente de campo y lazo de corriente magnetizante. La referencia de corriente magnetizante es su valor nominal, 3.39 A, y la salida final del lazo de corriente de par es la componente de tensión \hat{u}_{sx} .

Los reguladores propuestos para los lazos de las dos ramas son de tipo PI (proporcional integral), para eliminar el error de posición en el permanente. El esquema general de control se puede ver en la Fig. 4.2.

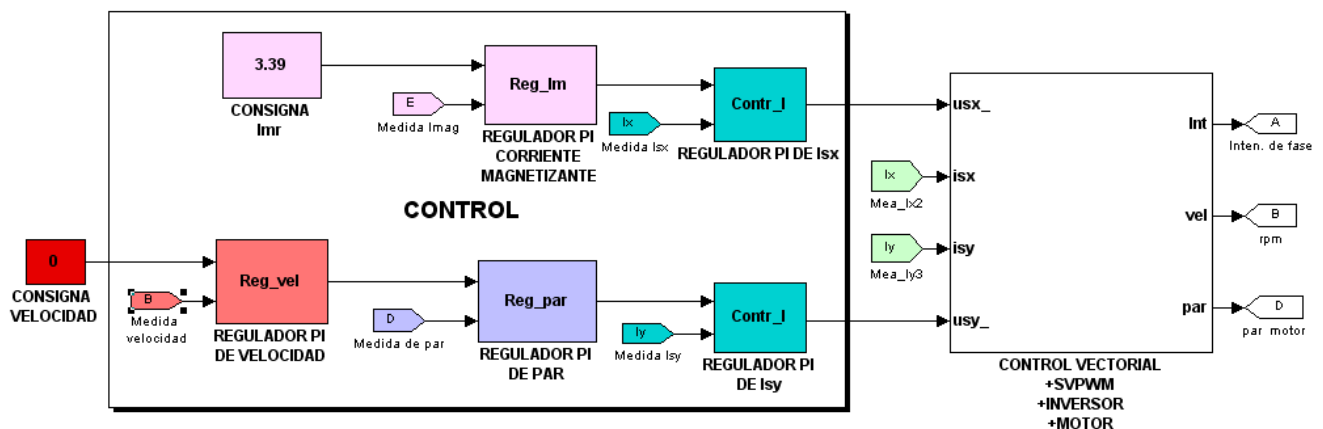


Fig. 4.2 Esquema general de regulación

La dinámica más alta del sistema se ha fijado en los lazos de corriente de par y campo. Se parte de una frecuencia de conmutación del controlador de 10 kHz, seleccionando una frecuencia de corte para los lazos de corriente de 1 kHz y dinámicas más lentas para los lazos de par y velocidad.

La frecuencia de 10 KHz del controlador se ha seleccionado teniendo en cuenta la capacidad computacional de la tarjeta DS1103. Como se verá en el capítulo 6, una vez cargado el programa en la tarjeta, y ejecutándolo en ControlDesk, se puede observar el tiempo que se invierte en ejecutar un ciclo de programa. Con ese dato, la idea es ajustar en la medida de lo posible la frecuencia del controlador a esa frecuencia máxima que permite la tarjeta, para obtener un control más preciso del sistema.

4.3 RESULTADOS.

En la tabla VII se muestran los valores obtenidos de los parámetros para los algoritmos de control de las dos ramas, de campo y de par.

Tabla VII Constantes de los reguladores

Control rama Isy	
Kp_isy (Cte proporcional del lazo de corriente de par)	135.5 V/A
Ki_isy (Cte integral del lazo de corriente de par)	23880 V/A.s
Kp_par (Cte proporcional del lazo de par)	0.076 A/N.m
Ki_par (Cte integral del lazo de par)	478.12 A/N.m.s
Kp_vel (Cte proporcional del lazo de velocidad)	0.23 N.m/rpm
Ki_vel (Cte integral del lazo de velocidad)	2.21 N.m/rpm.s
Control rama Isx	
Kp_isx (Cte proporcional del lazo de corriente de campo)	135.5 V/A
Ki_isx (Cte integral del lazo de corriente de campo)	23880 V/A.s
Kp_im (Cte proporcional del lazo de corriente magnetizante)	2
Ki_im (Cte integral del lazo de corriente magnetizante)	18.57

CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PLANTA Y LOS CONTROLADORES.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Una vez obtenido el modelo del sistema y la configuración y ajuste de los algoritmos de control se procede a realizar la simulación del sistema completo. Esta simulación se va a llevar a cabo mediante Matlab/Simulink.

La simulación se realiza tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto. Tanto en la simulación en tiempo continuo como en tiempo discreto se implementa el efecto de muestreo del controlador.

El paso de simulación que se utiliza en Simulink es de $1/400000$ s, suficientemente pequeño en comparación con los periodos característicos del sistema como para considerar la simulación en tiempo continuo. En cuanto al motor asíncrono, se han fijado unos valores de coeficiente de inercia y de rozamiento viscoso de $J= 0.01 \text{ Kg.m}^2$ y $D= 0.0001 \text{ Pa.s}$ respectivamente, ambos datos tomados de trabajos anteriores [6].

Al modelo de simulación en tiempo continuo se le añaden varios bloques “Zero-order hold”, o “bloqueadores”, cuya función es retener la señal de entrada el tiempo que se le especifique (en nuestro caso $1/10000$ s). De este modo se implementa el efecto de muestreo de señales del controlador, aunque interiormente siga realizando cálculos. Estos bloques, como se puede ver en la Fig. 5.1, se colocan en las señales de salida del motor (corrientes, velocidad y par motor), ya que estas señales no solo se usan en las realimentaciones de los lazos (par y velocidad), sino que también se usan para los cálculos internos del control (modelo de flujo, cálculo i_{sx} e i_{sy}). Además también se colocan bloqueadores en las referencias de ondas de pulsos de cada lazo, de este modo podemos simular los lazos por separado.

Para el modelo de simulación en tiempo discreto, Fig. 5.2, se utiliza el mismo esquema de control que en tiempo continuo, pero sin bloqueadores. Se ha recogido todo el control del sistema (reguladores, control vectorial y SVPWM) en un subsistema ejecutado por trigger. Se utiliza como trigger un tren de pulsos de 10KHz. De esta forma todo el subsistema se ejecuta a esa frecuencia, y sólo una vez.

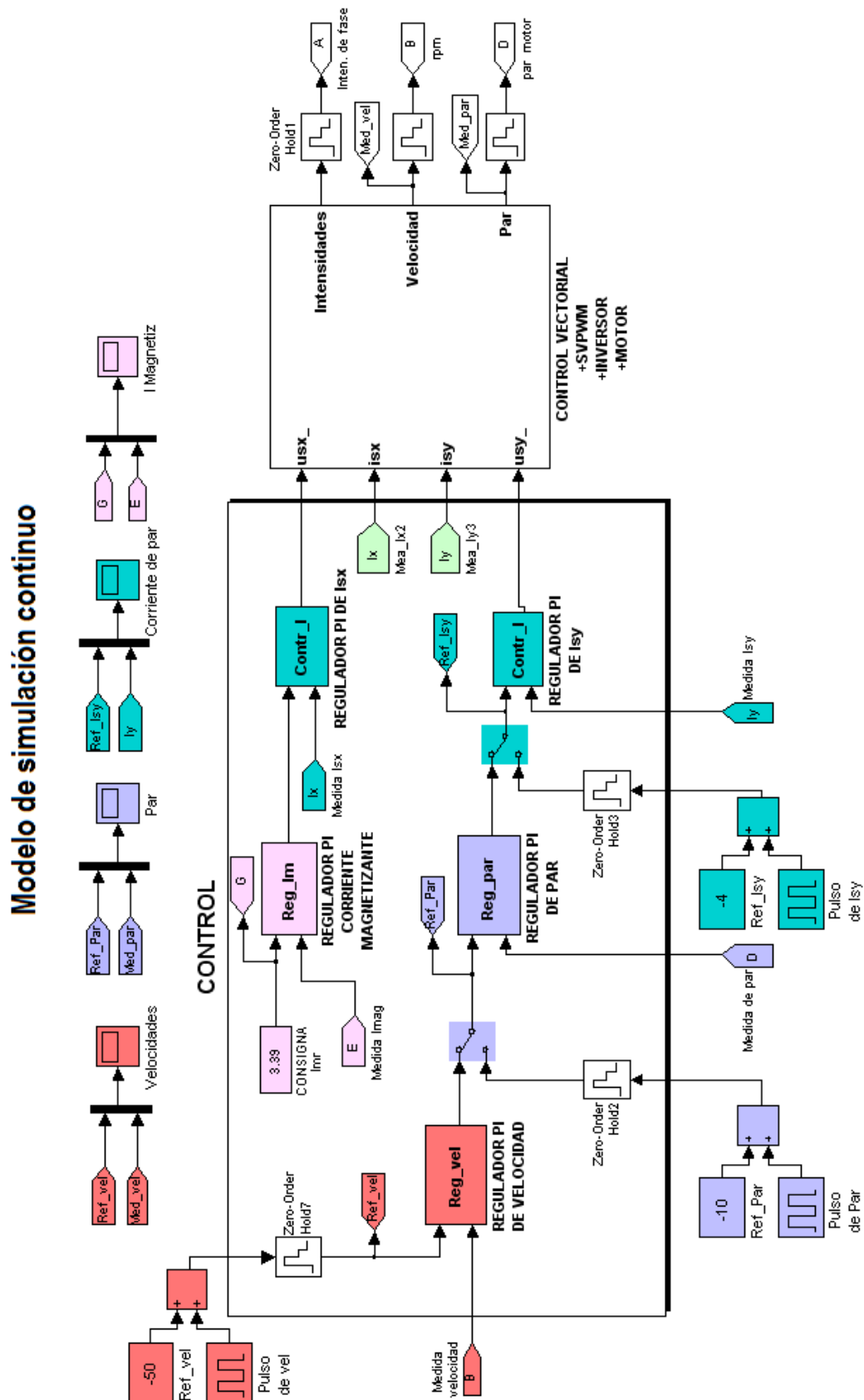


Fig. 5.1 Modelo de simulación en tiempo continuo

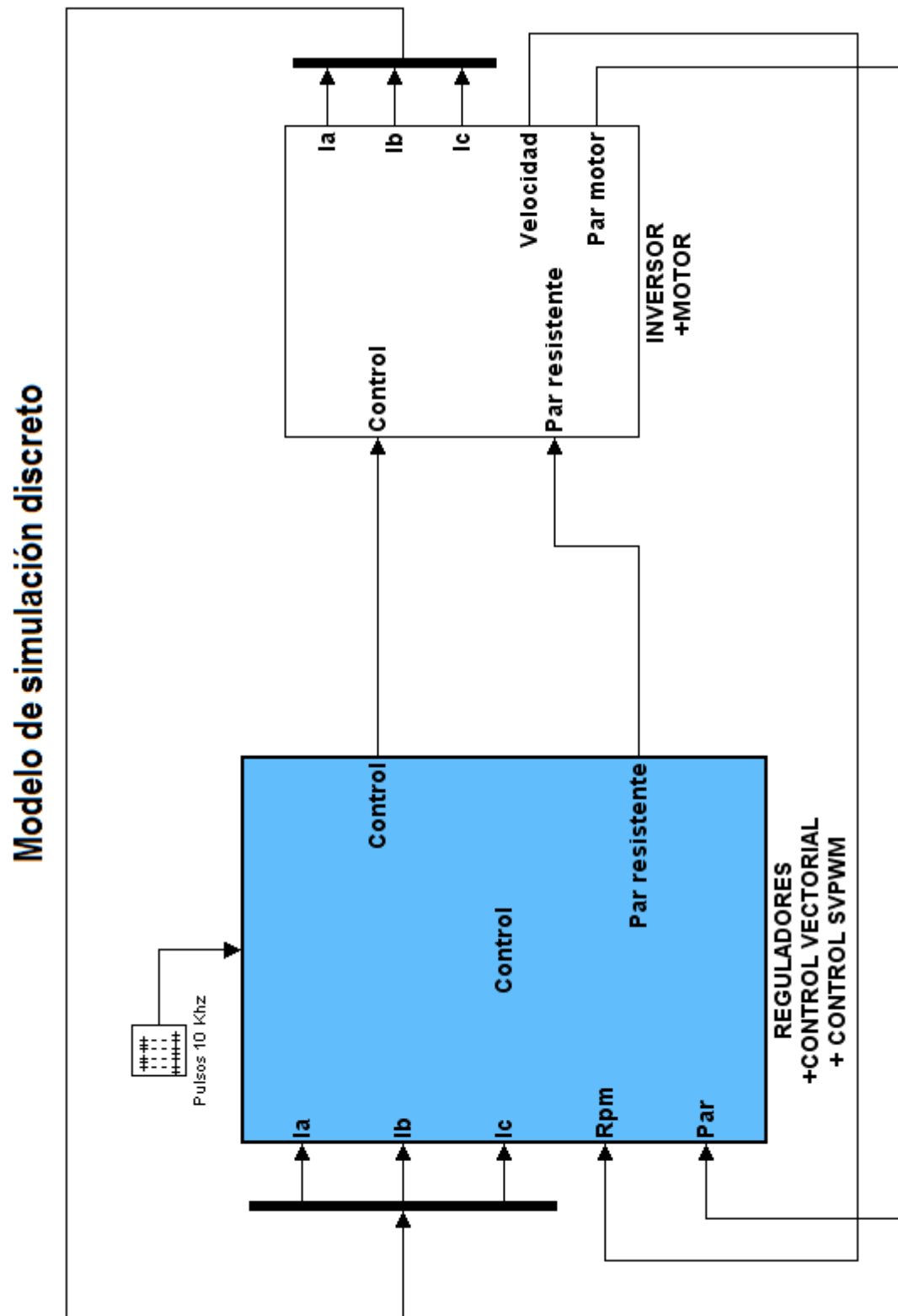


Fig. 5.2 Modelo de simulación en tiempo discreto

5.2 RESULTADOS

Antes de exponer los resultados es preciso definir lo que se va a observar. El modelo de simulación contiene un modelo continuo y uno discreto, como se acaba de ver. Los ensayos que se practican en estos modelos de simulación son cuatro: un ensayo para el lazo de velocidad, un ensayo para el lazo de par, un ensayo para el lazo de corriente de par y un ensayo para el lazo de corriente magnetizante. No se exponen aquí los resultados del lazo de corriente de campo ya que el regulador es el mismo que el de corriente de par, luego la dinámica que presenta es la misma.

Los resultados se analizan a partir de aproximadamente 0.3s (ver Fig.5.3), que es el tiempo que tarda la corriente magnetizante en alcanzar su valor nominal, y cuando empieza a funcionar correctamente el desacoplo. En cuanto a la carga, se ha simulado el sistema con carga cuadrática, a partir del punto de operación nominal (14.7 Nm, 1420 rpm)

Para el lazo de corriente magnetizante se introduce la señal de referencia nominal, cuyo valor es constante y es 3.39 A.

Para el lazo de corriente de par se introduce una señal escalón de intensidad de referencia, con una amplitud de 8 A, un periodo de 0.025 s y un offset de -4 A.

Para el lazo de par se introduce una señal escalón de par de referencia, con una amplitud de 10 Nm, un periodo de 0.05 s y un offset de -5 Nm.

Para el lazo de velocidad se introduce una señal escalón de velocidad de referencia, con una amplitud de 100 rpm, un periodo de 0.6 s, y un offset de -50 rpm.

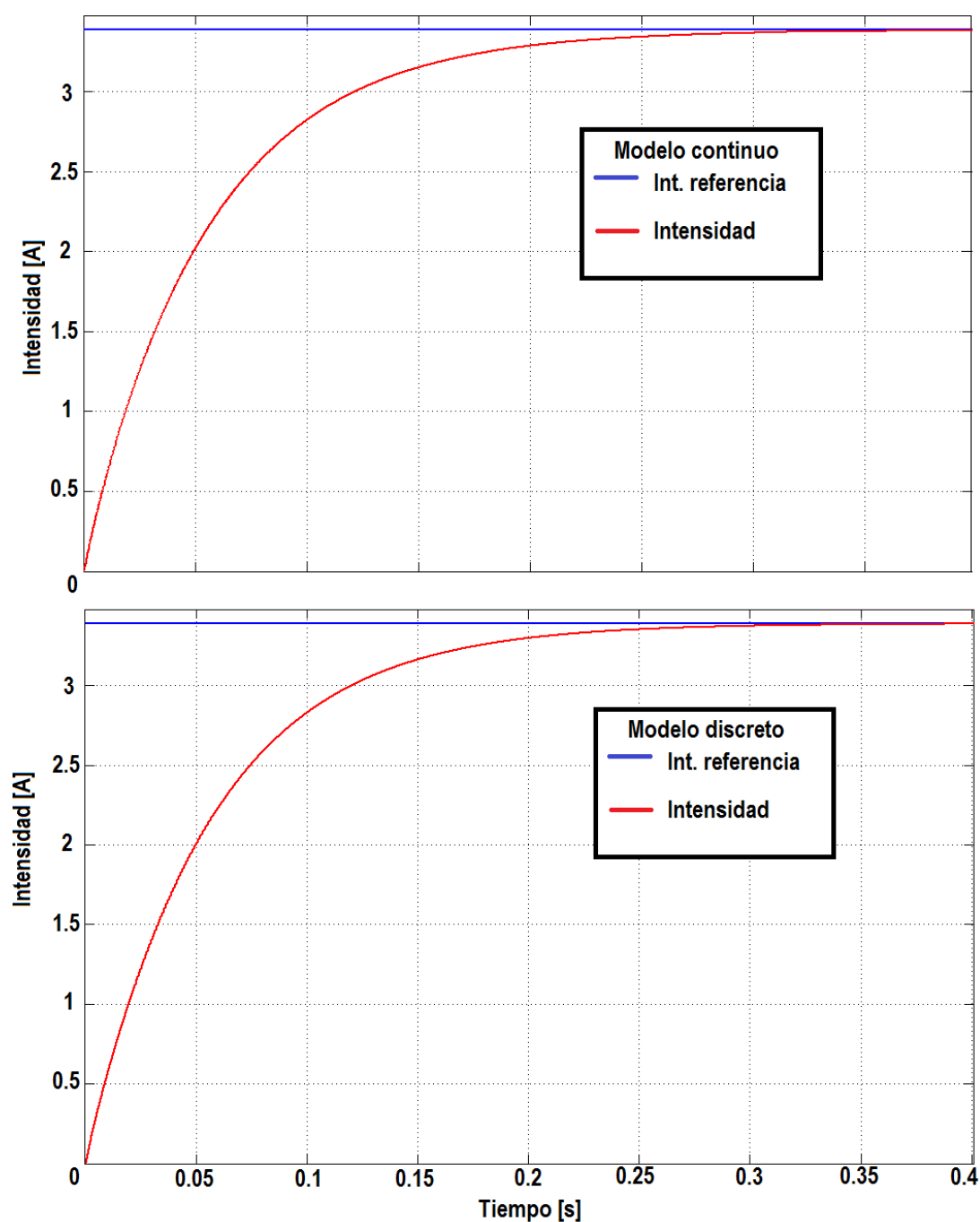


Fig. 5.3 Respuesta dinámica del lazo de corriente magnetizante

Las principales características de la dinámica, tanto en continuo como en discreto son: un tiempo de respuesta de 0.25 s, sobreoscilación nula, y un error de posición 0. Se puede ver que aproximadamente en 0.3 s la corriente magnetizante alcanza su valor nominal, 3.39 A.

En la Fig. 5.4 se muestra la respuesta dinámica del lazo de corriente de par.

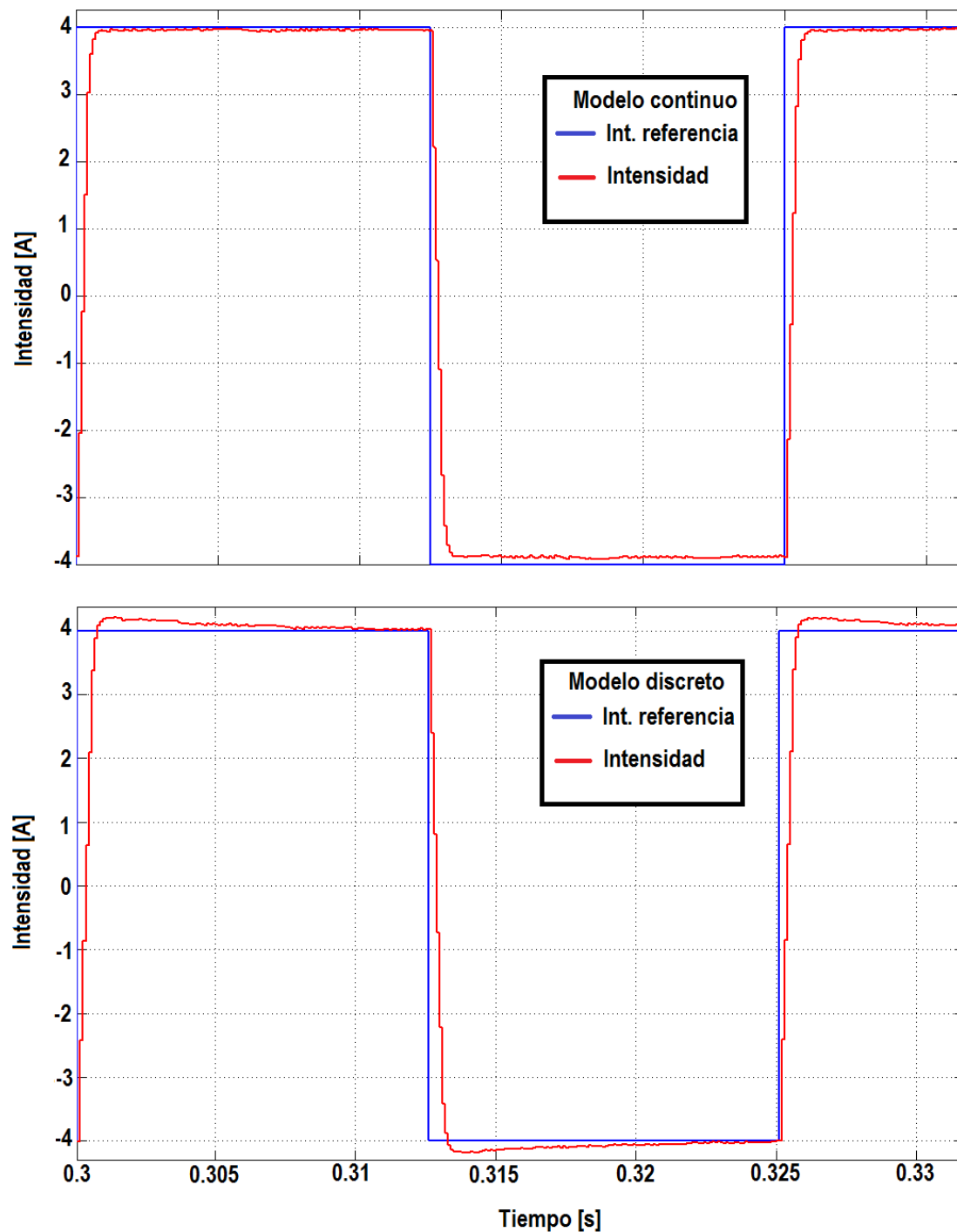


Fig. 5.4 Respuesta dinámica del lazo de corriente de par

Ambos modelos presentan un error de posición 0, con un tiempo de respuesta de aprox. 0.002 s, sin embargo el modelo discreto presenta una sobreoscilación del 6% aprox.

En la Fig. 5.5 se muestra la respuesta dinámica del lazo de par

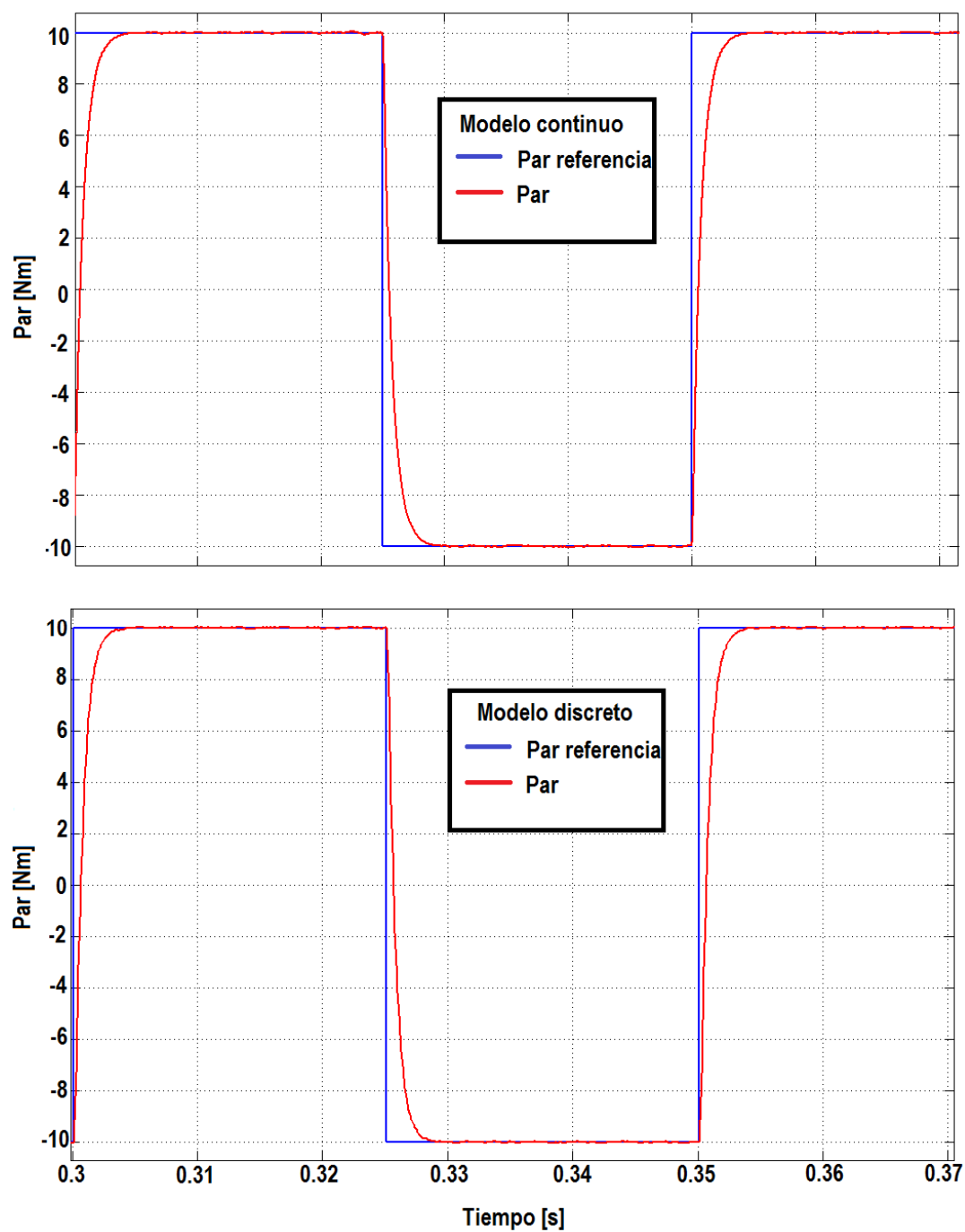


Fig. 5.5 Respuesta dinámica del lazo de par

Como se ve en la figura, ambos modelos presentan las mismas características dinámicas: tiempo de respuesta de 0.04 s, sobreoscilación nula, error de posición 0.

En la Fig. 5.6 se muestra la respuesta dinámica del lazo de velocidad.

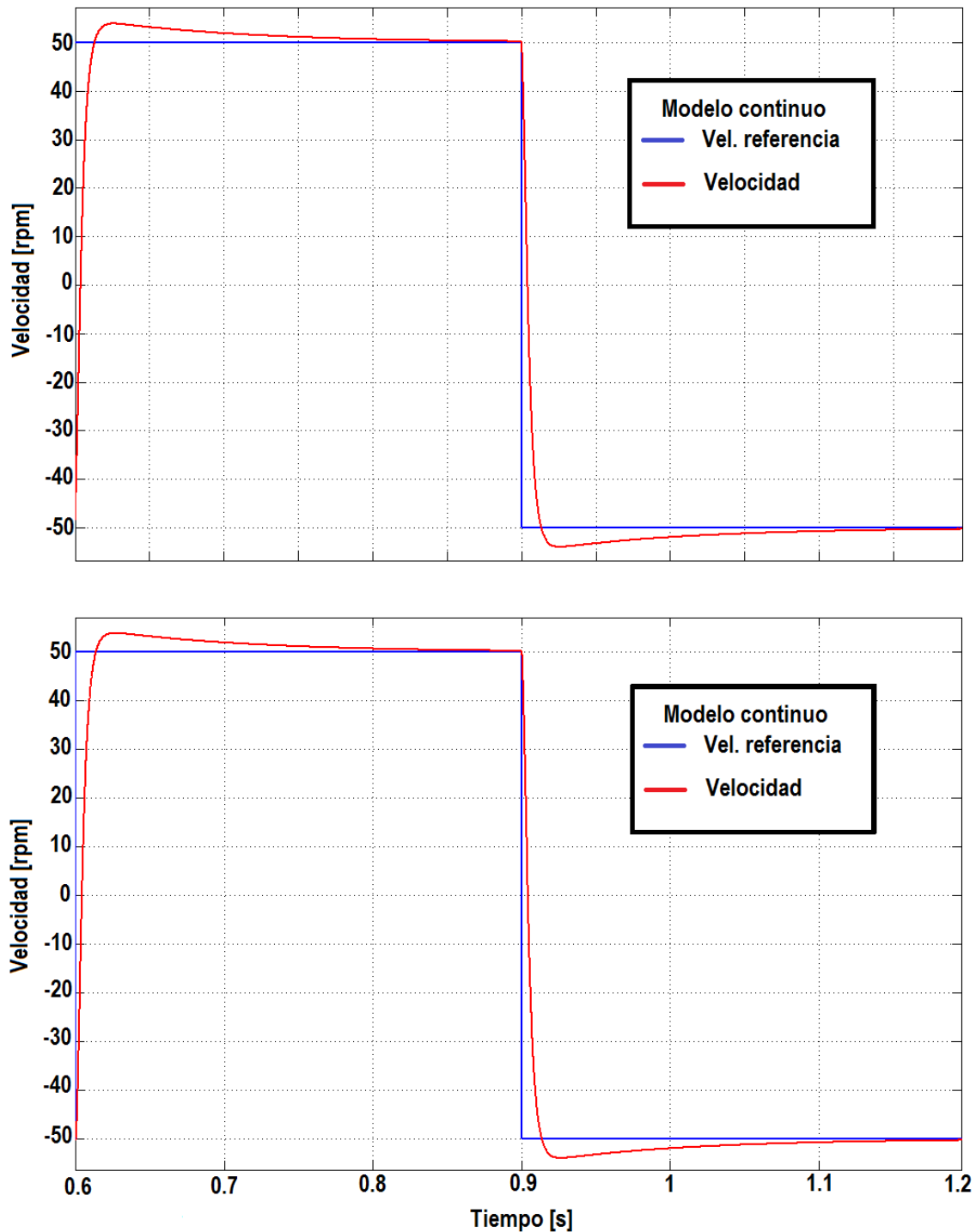


Fig. 5.6 Respuesta dinámica del lazo de velocidad

Las respuestas de los dos modelos son muy parecidas, con un tiempo de respuesta aprox. de 0.12 s, una sobreoscilación del 10% y un error de posición nulo.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede decir que las respuestas dinámicas son aceptables, siempre teniendo en cuenta que no se han prefijado unos objetivos específicos a conseguir. Para una aplicación o trabajo concretos del motor sí que se habrían fijado unos parámetros de respuesta a cumplir, y se habrían diseñado los controladores en función de esos objetivos.

CAPÍTULO 6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN DSPACE

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez simulado el sistema y viendo que los resultados son aceptables, se procede a implementar el control en Dspace y realizar la prueba física del control en el motor asíncrono.

Se fija un paso de simulación de 1/10000 KHz en Matlab/Simulink. Por otro lado, el “RTW system target file” es rti1103.tlc correspondiente a la tarjeta DS1103.

Tras ajustar los parámetros de configuración, mediante el comando Tools->Code generation->Build Model de SIMULINK se inicia la construcción del programa.

Si la compilación termina correctamente, y el hardware está conectado, el programa se descarga en la tarjeta DS1103 y se inicia su ejecución.

6.2 INTERFAZ GRÁFICA Y OPERACIÓN EN CONTROLDESK

Tras generar el programa, compilarlo y lanzar su ejecución en la tarjeta DS1103, es necesario ver cómo evolucionan los valores calculados por la simulación e interaccionar con el control.

Para ello se utiliza el programa “ControlDesk”. Desde este programa, se diseña una interfaz gráfica basada en paneles virtuales. Cuando se activa la interfaz gráfica, se puede ver la evolución de las variables calculadas por la simulación, así como modificar sus valores.

ControlDesk es un programa suministrado por Dspace para controlar la ejecución tanto de simulaciones como de aplicaciones en tiempo real.

En la tarjeta DS1103 se ejecuta el programa de simulación correspondiente al modelo Simulink. ControlDesk permite:

- Cargar el programa de control.
- Arrancar y parar la ejecución del programa de control.
- Visualizar en tiempo real los valores calculados por el programa de simulación.
- Modificar los valores utilizados por la simulación.

Para activar el programa de control del motor asíncrono se abre un experimento. El experimento permite asociar el programa a ejecutar en la tarjeta DS1103 con varios “layouts”, a la vez que descarga los programas compilados en C.

En los “layouts” se colocan controles, llamados instrumentos virtuales, de forma similar a los paneles frontales de actuación de los controles exteriores de las máquinas. Los instrumentos virtuales pueden ser indicadores (solo muestran los valores calculados) o controles (muestran y permiten modificar los valores calculados). A estos instrumentos virtuales se les asignan variables del programa de control, de la siguiente forma:

- Seleccionar el archivo del programa de control.
- Navegar por la estructura del modelo hasta llegar a la variable deseada.
- Arrastrar la variable sobre el instrumento deseado.

Además, ControlDesk dispone de “plotters” para mostrar gráficas en tiempo real, con posibilidades de zoom, scroll, cursores, trigger independiente, etc.

En las Fig. 6.1 y 6.2 se muestran los dos paneles de control contruidos para este trabajo. El primero es el panel de control principal, donde se muestran los parámetros más importantes tanto del control como del motor. Cuenta con varias opciones para elegir el tipo de carga (nula, constante, cuadrática o cúbica) y la referencia de velocidad (constante o referencia cuadrada). También se puede ver toda la parte de control de fallos, y las habilitaciones del sistema. Recordar que en el Anexo IV se puede ver en detalle los esquemas de bloques, donde se construyen todas estas opciones de control.

A la izquierda se pueden ver los displays indicadores de dos parámetros importantes: Sample Time y Turnaround Time. El primero es el paso de simulación con el que se está ejecutando el programa, en nuestro caso, 0.0001 s ($1/10000\text{KHz}$). El segundo indica el tiempo que le cuesta a la tarjeta ejecutar un ciclo completo del programa. Este parámetro es importante de cara a ajustar la frecuencia de muestreo del controlador a la frecuencia máxima que permite la tarjeta, para nuestro programa. No obstante, hay que mantener un margen de tiempo de seguridad, en la Fig. 6.1 se puede ver que el Turnaround Time es de 0.000074 s, si este tiempo supera al Sample Time saltaría un error de ejecución. También hay que tener en cuenta que el uso de plotters y la visualización gráfica de varias señales simultáneamente aumentan el Turnaround Time, de ahí la importancia a salvaguardar el margen comentado.

Trabajando a una frecuencia de muestreo ajustada a la frecuencia máxima que permite la tarjeta para este programa, conseguimos un control más preciso, reduciendo así las variaciones de los parámetros entre pasos de simulación.

El segundo panel virtual, Fig. 6.2, muestra las características y parámetros de los reguladores utilizados en el control. Desde este panel se pueden modificar estos parámetros, así como elegir las referencias de entrada de cada lazo (similar a la estructura usada en la simulación). Además a la derecha se pueden ver diversos plotters, que muestran las evoluciones de las señales de referencia y medida en cada lazo.

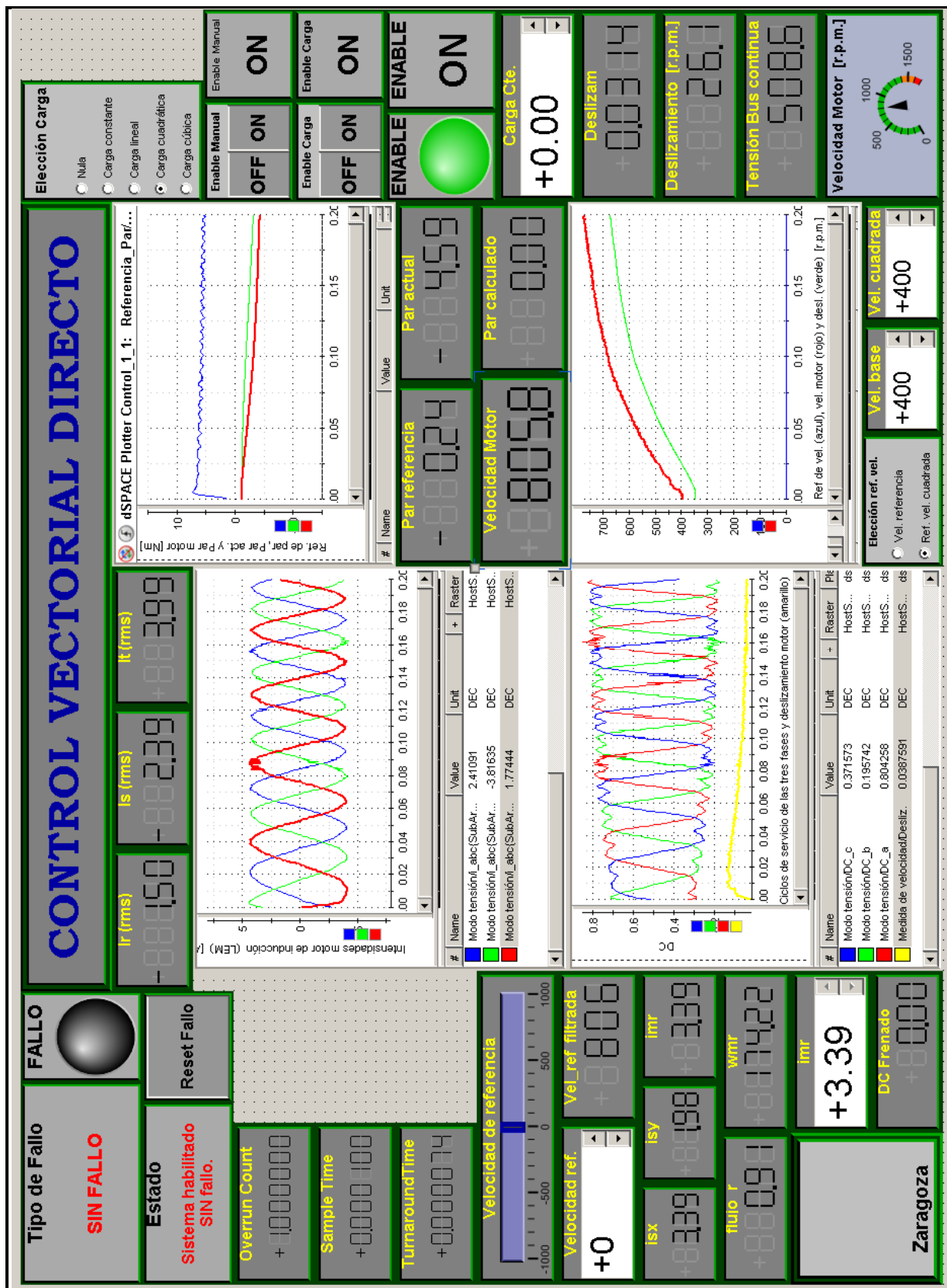


Fig. 6.1 Panel principal de control de ControlDesk

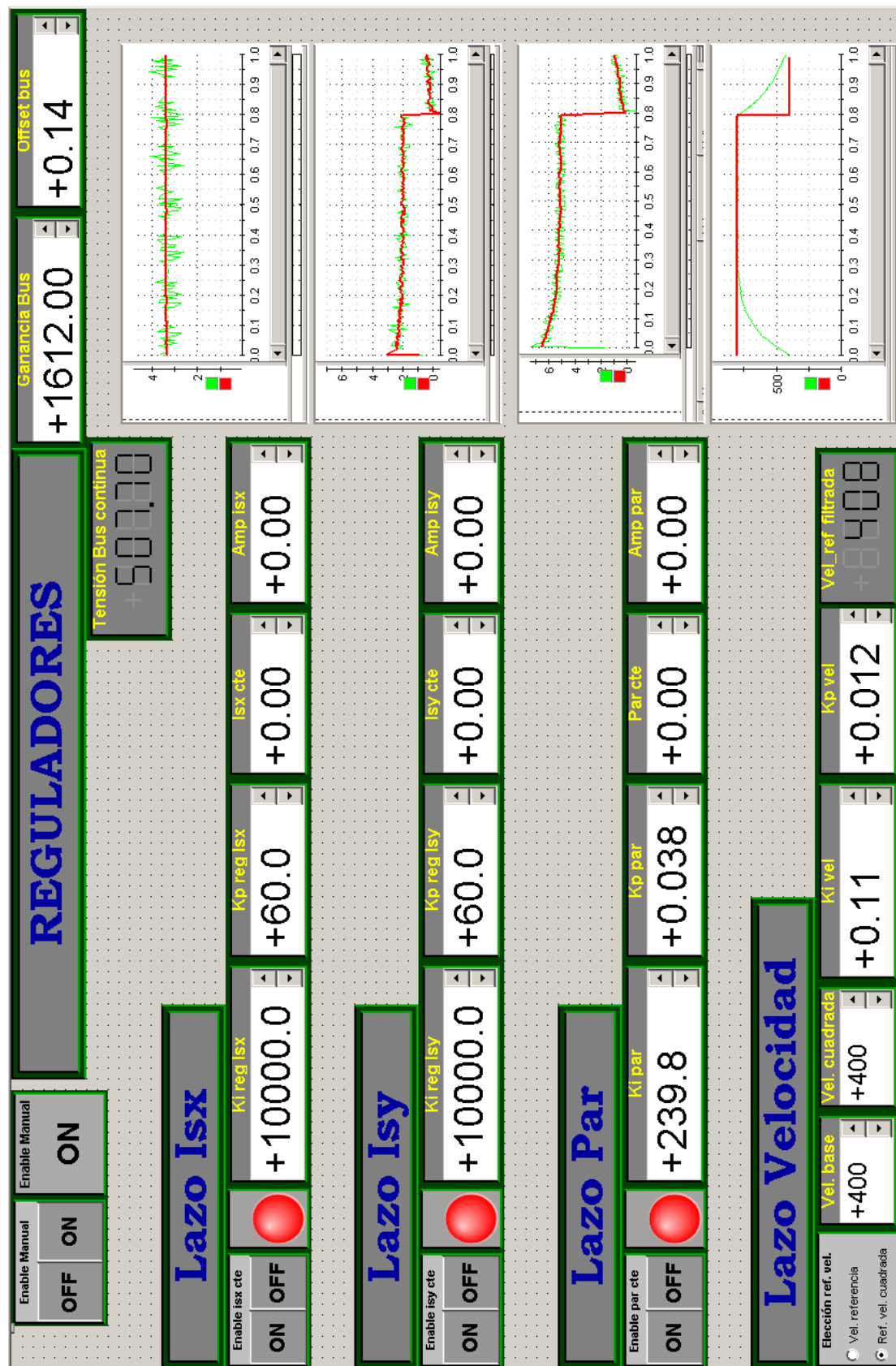


Fig. 6.2 Panel de control de los reguladores de ControlDesk

6.3 RESULTADOS

Después realizar la calibración de los diferentes sensores, ajustando sus ganancias y offsets, el sistema ya está preparado para su prueba física.

Las primeras pruebas realizadas revelaron un control muy nervioso, con variaciones considerables de par y corrientes, además de provocar el eje del motor un ruido estridente. Una posible explicación de este comportamiento es la fuerte dependencia de las ecuaciones con la constante de tiempo del rotor, T_r . Esta constante puede variar con parámetros como la temperatura o el nivel de saturación, lo que provoca inestabilidades si se calcula de forma inexacta. Para este trabajo hemos considerado un valor fijo de T_r , quedaría como posible objetivo de otros trabajos una estimación más precisa de esta constante, viendo su evolución según los parámetros mencionados.

Otro aspecto importante a tener en cuenta son los filtros de par y velocidad que se utilizan para obtener las medidas. Si se filtra mucho se puede perder información, pero si se filtra poco, el sistema se vuelve muy nervioso ya que las interferencias que se introducen en la realimentación no se eliminan.

Para mejorar el comportamiento del sistema, se han ajustado experimentalmente tanto las constantes de tiempo de los filtros de par y velocidad, como los parámetros de los lazos por separado, hasta conseguir unas respuestas aceptables, según mi propio criterio y el de mi tutor. Los valores de las constantes de tiempo de los filtros de par y velocidad son: 0.001 s y 0.01 s para los filtros de velocidad, y 0.001 s y 1 s para los filtros de par. En la Tabla VIII se pueden ver los nuevos parámetros de los reguladores.

Tabla VIII Parámetros de los reguladores después del ajuste experimental

Control rama Isy	
Kp_isy (Cte proporcional del lazo de corriente de par)	60 V/A
Ki_isy (Cte integral del lazo de corriente de par)	10000 V/A.s
Kp_par (Cte proporcional del lazo de par)	0.038 A/N.m
Ki_par (Cte integral del lazo de par)	239.8 A/N.m.s
Kp_vel (Cte proporcional del lazo de velocidad)	0.012 N.m/rpm
Ki_vel (Cte integral del lazo de velocidad)	0.11 N.m/rpm.s
Control rama Isx	
Kp_isx (Cte proporcional del lazo de corriente de campo)	60 V/A
Ki_isx (Cte integral del lazo de corriente de campo)	10000 V/A.s
Kp_im (Cte proporcional del lazo de corriente magnetizante)	2
Ki_im (Cte integral del lazo de corriente magnetizante)	18.57

Como se ve, se han reducido los parámetros de casi todos los lazos, distanciando más los anchos de banda y manteniendo la relación integral-proporcional en la medida de lo posible. El tipo de carga que se ha elegido para las pruebas es carga cuadrática.

En la Fig. 6.3 se puede ver la respuesta del lazo de corriente de campo, i_{sx}

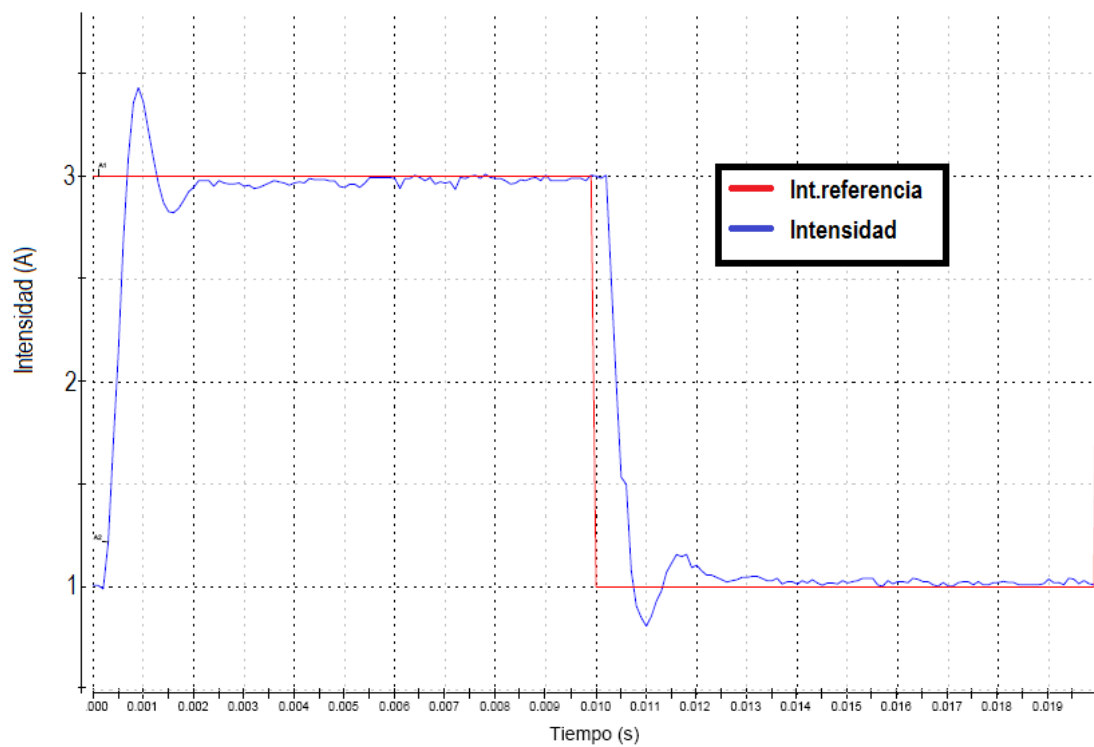


Fig. 6.3 Respuesta dinámica del lazo de corriente de campo

En la Fig. 6.4 se muestra la respuesta del lazo de corriente de par, i_{sy} .

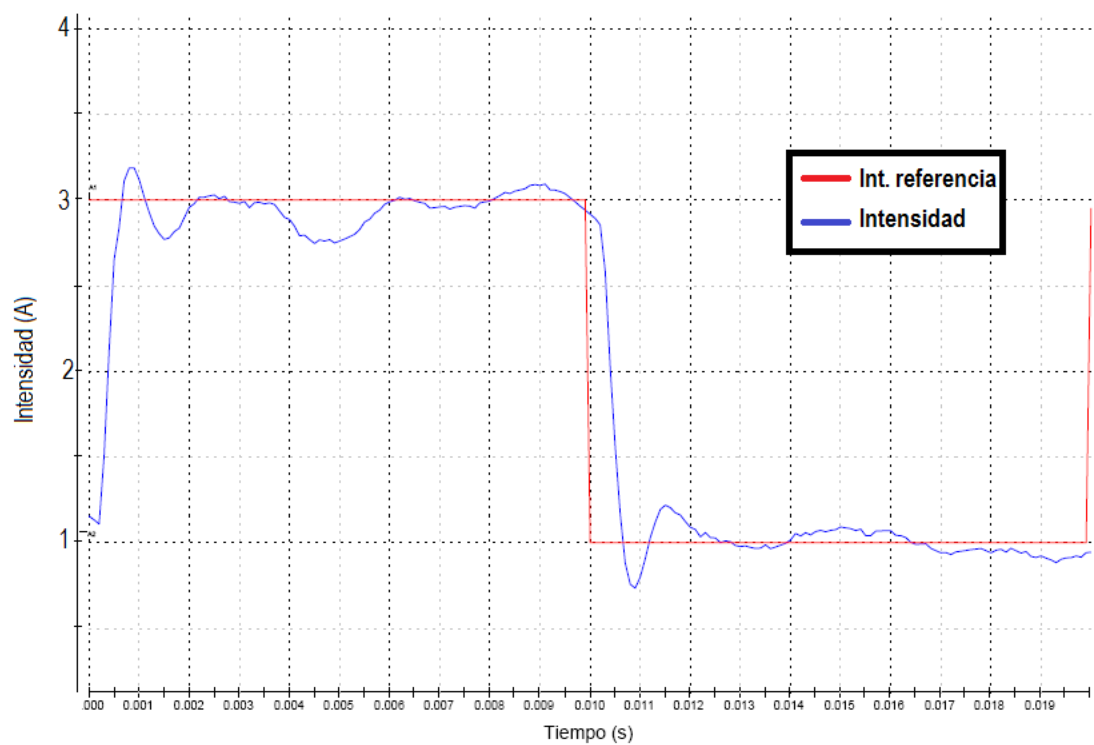


Fig. 6.4 Respuesta dinámica del lazo de corriente de par

En las Fig. 6.5 y 6.6 se muestran las respuestas dinámicas de los lazos de par y velocidad, respectivamente.

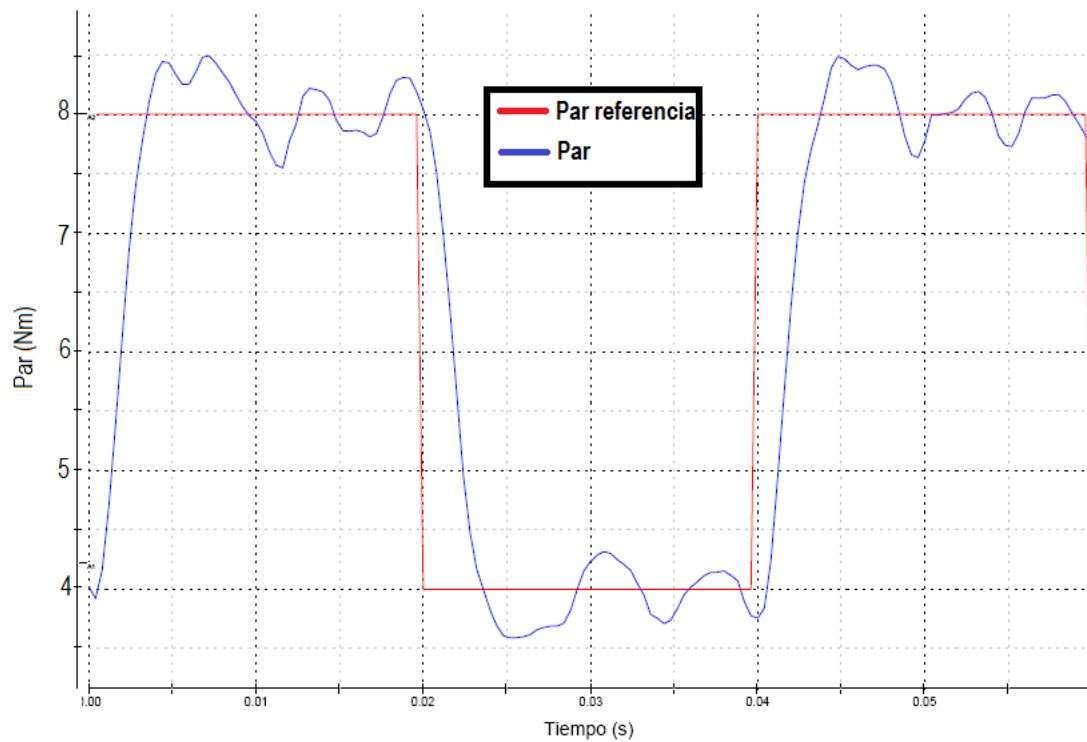


Fig. 6.5 Respuesta dinámica del lazo de par

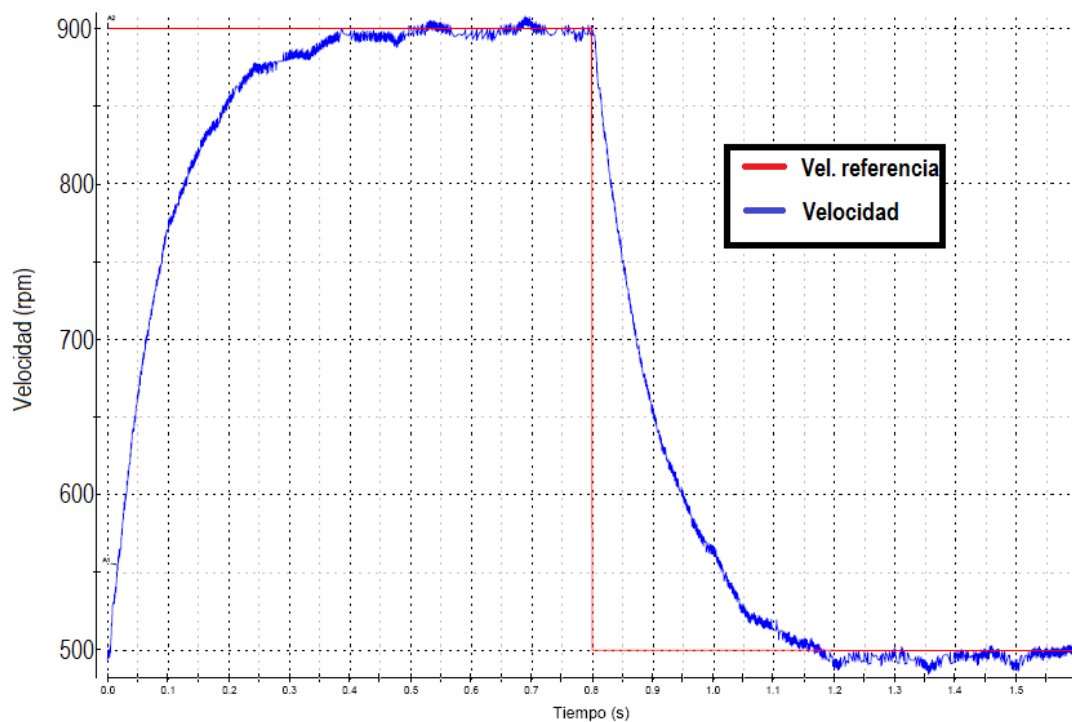


Fig. 6.6 Respuesta dinámica del lazo de velocidad

Finalmente, en las Fig. 6.7 y 6.8 se muestran las formas de onda de los ciclos de trabajo resultantes del SVPWM, para una velocidad de 900 rpm y las corrientes de fase del motor para una velocidad de 500 rpm.

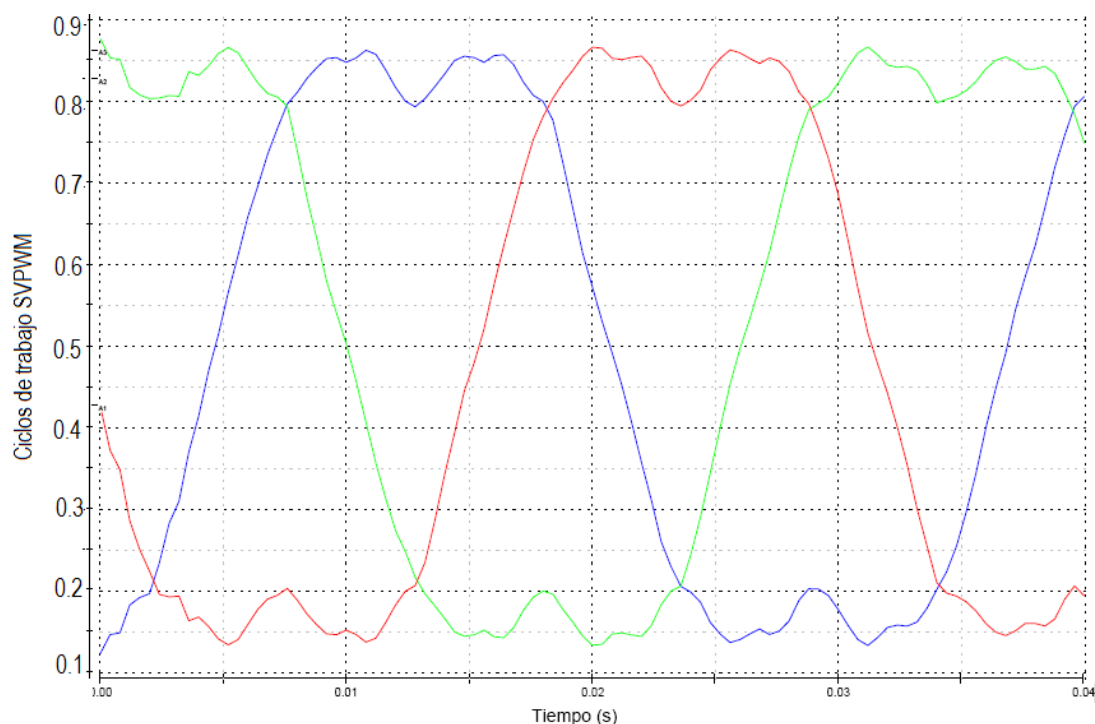


Fig. 6.7 Ciclos de trabajo del SVPWM a 900rpm

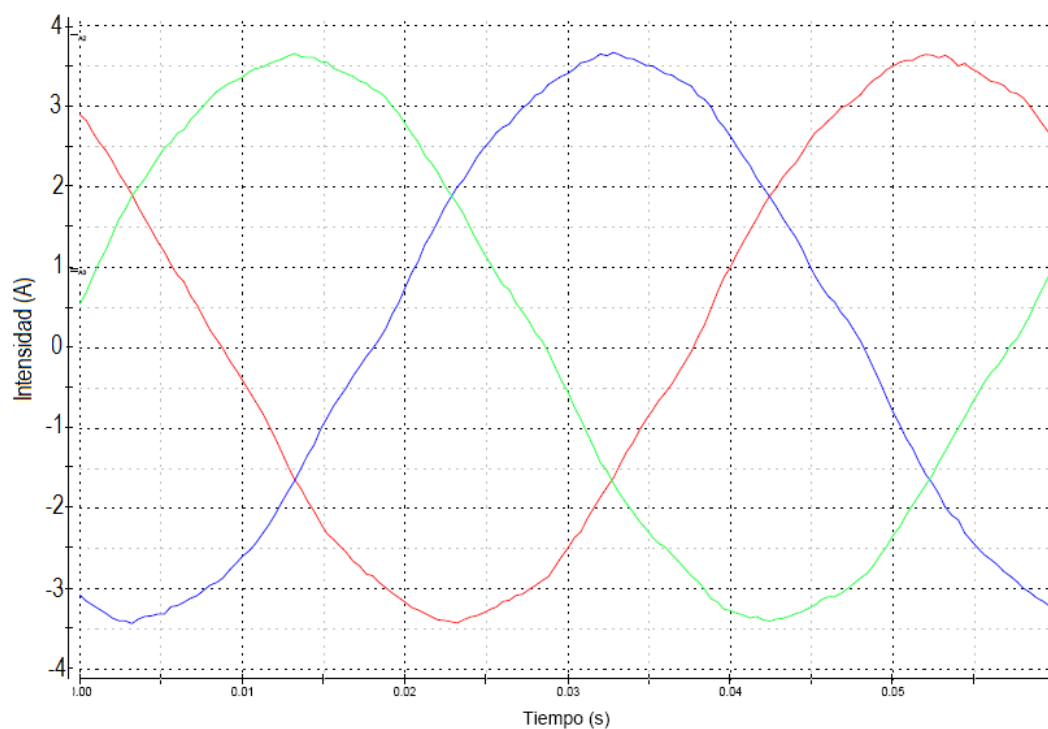


Fig. 6.8 Intensidades de fase del motor asíncrono a 500 rpm

Como se puede ver en las figuras, la respuesta del lazo de par es principalmente la que más inestabilidad presenta en su medida, con sobreoscilaciones del 6% aproximadamente. Estas variaciones se pueden ver también a menor escala en el lazo de corriente de par, con una sobreoscilación del 8%.

En cuanto al lazo de corriente de campo, presenta una sobreoscilación del 13%, pero más estable que la medida de corriente de par. El lazo de velocidad no presenta sobreoscilación, con un tiempo de respuesta de 0.4 s y error de posición nulo.

CONCLUSIONES

A partir del trabajo desarrollado y de los resultados expuestos, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- Los modelos de simulación de la planta, motor asíncrono y modulación SVPWM, representan adecuadamente el comportamiento “ideal” del sistema.
- Se ha visto que el comportamiento real del sistema, aparte de depender del modelo de control diseñado, viene además determinado por el grado de precisión a la hora de estimar parámetros como la constante de tiempo del rotor. Además también influye el diseño de los filtros de las señales de velocidad y par, que inciden directamente en la cadena de regulación. Esta sensibilidad y ajuste queda como objetivo para posibles trabajos futuros, en los que se analice de forma más precisa y detallada la evolución de estas dependencias con parámetros como la temperatura o el nivel de saturación de inductancias.
- La plataforma creada para el control del motor asíncrono ofrece una visión global para observar cómo se realiza el control y una gran versatilidad a la hora de ensayar diferentes controladores. Queda como instalación fija en el laboratorio BSH de la cuarta planta del edificio Ada Byron, para su futuro uso en posibles trabajos, proyectos o prácticas.
- Se ha visto la potencia de la herramienta Dspace, tanto en hardware, mediante la tarjeta DS1103, como en software mediante el programa ControlDesk, que permite realizar simulaciones y aplicaciones en tiempo real, con gran capacidad de cálculo y una interfaz amigable, versátil e intuitiva.

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

FIG. 2.1	ESQUEMA SIMPLIFICADO DE INTERACTUACIÓN ENTRE LOS PRINCIPALES COMPONENTES.	6
FIG. 2.2	IMAGEN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN ASÍNCRONO	7
FIG. 2.3	ESQUEMA DEL RECTIFICADOR-INVERSOR DEL MOTOR ASÍNCRONO.....	8
FIG. 2.4	IMAGEN ILUSTRATIVA DEL RECTIFICADOR-INVERSOR	9
FIG. 2.5	IMAGEN DEL MOTOR SÍNCRONO.....	10
FIG. 2.6	CAJA DE MULTICONEXIÓN CP1103	12
FIG. 2.7	ESQUEMA DE CONECTORES DE LA CAJA CP1103.....	12
FIG. 3.1	TRANSFORMACIONES DE REFERENCIA.	14
FIG. 3.2	MODELO DE FLUJO EN LA REFERENCIA ORIENTADA AL FLUJO DEL ROTOR. ENTRADAS i_sA , i_sB , i_sC Y ω_r	17
FIG. 3.3	FORMAS DE ONDA SVPWM (CARRIER BASED).....	18
FIG. 4.1	PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE MÁQUINA ASÍNCRONA	19
FIG. 4.2	ESQUEMA GENERAL DE REGULACIÓN	20
FIG. 5.1	MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO CONTINUO	23
FIG. 5.2	MODELO DE SIMULACIÓN EN TIEMPO DISCRETO	24
FIG. 5.3	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE CORRIENTE MAGNETIZANTE	26
FIG. 5.4	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE CORRIENTE DE PAR	27
FIG. 5.5	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE PAR	28
FIG. 5.6	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE VELOCIDAD	29
FIG. 6.1	PANEL PRINCIPAL DE CONTROL DE CONTROLDESK.....	33
FIG. 6.2	PANEL DE CONTROL DE LOS REGULADORES DE CONTROLDESK	34
FIG. 6.3	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE CORRIENTE DE CAMPO	36
FIG. 6.4	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE CORRIENTE DE PAR	36
FIG. 6.5	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE PAR	37
FIG. 6.6	RESPUESTA DINÁMICA DEL LAZO DE VELOCIDAD	37
FIG. 6.7	CICLOS DE TRABAJO DEL SVPWM A 900RPM	38
FIG. 6.8	INTENSIDADES DE FASE DEL MOTOR ASÍNCRONO	38
TABLA I	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MOTOR ASÍNCRONO	8
TABLA II	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL INVERSOR DEL MOTOR ASÍNCRONO	9
TABLA III	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MOTOR SÍNCRONO	10
TABLA IV	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL INVERSOR DEL MOTOR SÍNCRONO.....	10
TABLA V	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL RECTIFICADOR DEL MOTOR SÍNCRONO	11
TABLA VI	PARÁMETROS BÁSICOS DEL CONTROL VECTORIAL POR TENSIÓN	15
TABLA VII	CONSTANTES DE LOS REGULADORES.....	21
TABLA VIII	PARÁMETROS DE LOS REGULADORES DESPUÉS DEL AJUSTE EXPERIMENTAL	35

REFERENCIAS

- [1] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines".Oxford science publications. 1990.
ISBN 0-19-859370-8
- [2] Ramón Piedrafita Moreno, "Control de Sistemas Industriales Continuos", Ed. Kronos. 2002.
ISBN 84-88502-74-5
- [3] Ramón Piedrafita Moreno, Antonio Romeo Tello, "Control Automático en los dominios frecuencial y de tiempo discreto", Ed. Kronos. 2003. ISBN 84-88502-77-X
- [4] DS1103 PPC Controller Board "Hardware Installation and Configuration", Release 7.4 DSPACE GmbH Germany. www.dspace.com
- [5] ControlDesk Next Generation "Basic Practices Guide", Release 7.4 DSPACE GmbH Germany. www.dspace.com
- [6] Proyecto Fin de Carrera "PUESTO FLEXIBLE PARA EL CONTROL DE MOTORES.CONTROL VECTORIAL DE MOTOR ASÍNCRONO". Nicolás Blasco Rueda. 2003.
- [7] Proyecto Final de Carrera "CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CON DSPACE". Diego Armunia Berges. 2007.
- [8] Mathcad 14. Copyright by Mathsoft.
- [9] Matlab Simulink versión 2011b. The mathworks Inc. www.mathworks.es
- [10] Catálogo DA 65.11.2000 de Siemens `Motion Control. Simovert Masterdrivers MC 0.55 kW a 250 kW´.
- [11] Catálogo nº 6SE7087-6KD50 de Siemens ´Simovert Masterdrivers Motion Control, inverter (DC-AC) Compact Type´
- [12] PDF "Field Oriented Control of Permanent Synchronous Motors" Microsemi www.actel.com